

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

MARIA LUÍSA CARVALHO DE SÁ MACHADO

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

Coorientador: Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ 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

🌐 <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 - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.*

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

Não sou nada.

Nunca serei nada.

Não posso querer ser nada.

À parte isso, tenho em mim todos os sonhos do mundo.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho pela disponibilidade, ajuda e apoio prestado no laboratório, ajudando-me sempre na procura de melhores soluções, pela dedicação, preocupação e amizade transmitida ao longo deste semestre.

Ao Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo pela ajuda preciosa no desenvolvimento dos códigos em Matlab, que contribuíram para a valorização técnica deste trabalho, pelas sugestões, disponibilidade e bom humor com que me contagiou.

Ao Sr. Miguel pela sua prontidão, criatividade, engenho e empenho na tentativa de auxiliar à procura da melhor solução técnica.

Ao Sr. Aníbal pela disponibilidade e ajuda na compreensão do funcionamento da instalação experimental.

Ao Laboratório de Materiais de Construção pela realização do ensaio de determinação da curva granulométrica do material granular utilizado neste estudo.

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

Ao Henrique, à Raquel e à Rita pela alegria contagiante, companhia e ajuda prestada durante a realização dos ensaios.

À Alexandra e à Carolina pela partilha, amizade e companheirismo demonstrado ao longo dos anos de curso.

À Liliana, que apesar da distância, esteve presente nos momentos mais difíceis e me ajudou a encarar os problemas de uma forma mais otimista.

Ao Hugo pelo carinho, apoio total e compreensão demonstrados nos momentos em que mais precisei.

Aos meus pais, não só pelos ensinamentos, experiências de vida e amor incondicional com que me brindaram ao longo da minha vida, mas também pelos sacrifícios e obstáculos que tiveram de enfrentar, colocando sempre em primeiro lugar o meu sucesso académico.

Às minhas irmãs, Cristiana e Sofia, pela paciência e pelos conselhos dados, ajudando-me a tornar numa pessoa melhor.

Por último, quero agradecer à Associação Guias de Portugal pelas atitudes, valores e ensinamentos que me transmitiu, ajudando-me a superar os obstáculos que foram surgindo ao longo destes cinco anos.

RESUMO

Na dissipação de energia por jatos, uma parcela da energia cinética é dissipada ao longo do percurso aéreo do jato, ocorrendo a dissipação da energia em excesso no impacto com o colchão de água a jusante. Com efeito, o leito fica sujeito às flutuações turbulentas de pressão existentes devido à ação do jato, originando a formação de uma escavação.

O presente estudo surge com o intuito de dar continuidade ao estudo desenvolvido por Figueiredo (2010), cuja temática incide na análise da erosão a jusante de um descarregador de cheias equipado com um trampolim em salto de esqui.

O trabalho experimental foi realizado no laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e consistiu na caracterização da trajetória do jato e da geometria da escavação de erosão.

Tendo como base a técnica de aquisição de imagens, foram desenvolvidos novos métodos de medição 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. Os resultados obtidos foram satisfatórios e permitiram a aplicação de diversas expressões empíricas e semiempíricas para a previsão das dimensões da escavação de erosão.

Com a realização dos ensaios para diversas condições de teste, foi possível analisar a influência das diferentes variáveis: espessura do colchão de água, as condições de escoamento e o ângulo de saída do trampolim na configuração da erosão originada no fundo móvel. Os resultados obtidos foram comparados com os apresentados por outros autores.

Para algumas condições de escoamento específicas procedeu-se ainda à configuração 3D da escavação e à análise da evolução da erosão ao longo do tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Dissipação de energia, bacia de dissipação por jatos, trampolim em salto de esqui, fundo móvel, escavação de erosão.

ABSTRACT

The energy dissipation by jets can be divided in two parts: one regarding the kinetic energy dissipated along the jet trajectory and a second one to consider the energy that is dissipated on the impact with the tail water. Due to the jet impact, the riverbed is subjected to turbulent pressure fluctuations resulting in the formation of a scour hole.

The present study follows the work developed by Figueiredo (2010), devoted to the analysis of erosion downstream of a stepped spillway equipped with a ski jump bucket.

In the present work, using imaging techniques, new measurement methods have been developed for the characterization of the jet, in particular for the determination of the height of the flow on the output section in the ski jump bucket and its respective trajectory. The results were satisfactory and allowed the application of several empirical and semiempirical expressions for predicting the dimensions of the scour hole.

With the different experimental tested conditions, it was also possible to analyse the influence of different variables on the configuration of the erosion originated in the loose bed, namely: the tail water level, the flow rate and the takeoff angle of ski jump bucket. The results were compared to those presented by other authors.

For some specific flow conditions the 3D configuration of the scour hole and the erosion analysis over time were also determined.

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

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. DISSIPAÇÃO DE ENERGIA	3
2.2. TIPOS DE ÓRGÃOS DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA	4
2.2.1. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO	4
2.2.2. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO.....	6
2.2.3. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR MACRORUGOSIDADE	8
2.2.4. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR IMPACTO	8
2.2.5. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR JATOS	10
2.3. DISSIPAÇÃO POR JATOS	15
2.3.1. DEFINIÇÕES GERAIS.....	15
2.3.2. ALCANCE E ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA TEÓRICOS.....	17
2.3.3. ALCANCE EFETIVO DOS JATOS	19
2.3.4. PREVISÃO DA EROSIÃO DO LEITO	22
2.3.4.1. Grupo I.....	23
2.3.4.2. Grupo II.....	24
2.3.4.3. Grupo IV	31
2.3.4.4. Grupo V	33
2.4. MODELAÇÃO FÍSICA	35
3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	37
3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	37
3.2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO PARA O FUNDO MÓVEL	40
3.3. PROCEDIMENTO ADOTADO NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	41
3.4. MODELO DE SEMELHANÇA UTILIZADO.....	42
3.5. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO.....	43

3.5.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS	43
3.5.2. REGISTO DE TRAJETÓRIAS REAIS DE JATOS E MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA POR TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	44
3.5.2.1. Registo de trajetórias reais de jatos	45
3.5.2.2. Medição de alturas de água	48
3.5.3. DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DA ESCAVAÇÃO	51
3.5.4. MEDIÇÃO DO VOLUME E CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO	53
3.6. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	54
3.6.1. MEDIDOR DE CAUDAIS	54
3.6.2. IMAGEM DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS	58

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS

.....	59
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
4.2. CONDIÇÕES DE TESTE	59
4.3. DETERMINAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS.....	62
4.3.1. REGISTO DAS COORDENADAS DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS	62
4.3.2. DETERMINAÇÃO DO ALCANCE DO JATO	64
4.4. PERFIL LONGITUDINAL DA ESCAVAÇÃO	66
4.4.1. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO COLCHÃO DE ÁGUA.....	66
4.4.2. INFLUÊNCIA DO CAUDAL ESCOADO	69
4.4.3. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI	72
4.5. PROFUNDIDADE MÁXIMA DA ESCAVAÇÃO	76
4.5.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS OBTIDOS PELA APLICAÇÃO DAS EXPRESSÕES	78
4.5.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA APLICAÇÃO DAS EXPRESSÕES COM OS OBTIDOS POR FIGUEIREDO (2010)	86
4.5.3. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI	90
4.6. DIMENSÕES EM PLANTA	92
4.7. MEDIÇÃO DO VOLUME E CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO	98
4.8. EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESCAVAÇÃO DE EROÇÃO	101

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES.....	105
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

ANEXOS	113
ANEXO A: MODELOS DE TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI	115
ANEXO B: ENSAIO GRANULOMÉTRICO DO MATERIAL UTILIZADO PARA O FUNDO MÓVEL	117
ANEXO C: FATORES DE CALIBRAÇÃO PARA APLICAÇÃO DA TAI	119
ANEXO D: TRAJETÓRIA DO JATO	121
D.1: COORDENADAS	121
D.2: ALCANCES E ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DO JATO, OBTIDOS PELAS EXPRESSÕES E MEDIDOS E EXPERIMENTALMENTE	125
ANEXO E: PERFIS DE EROÇÃO	129
E.1: LEVANTAMENTO DO PERFIL LONGITUDINAL	129
E.2: INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO COLCHÃO DE ÁGUA	142
E.3: INFLUÊNCIA DO CAUDAL	146
ANEXO F: PROFUNDIDADE MÁXIMA	149
F.1: VARIÁVEIS NECESSÁRIAS PARA APLICAÇÃO DAS EXPRESSÕES	149
F.2: CÁLCULO DAS PROFUNDIDADES MÁXIMAS	151
ANEXO G: DIMENSÕES EM PLANTA	165
G.1: VALORES MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE	165
G.2: FOTOGRAFIAS DA ESCAVAÇÃO DE EROÇÃO	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Formação do ressalto hidráulico (Adaptado de Sousa (2011)).	5
Figura 2.2 – Barragem de Bemposta, sistema de dissipação por ressalto hidráulico [1].	6
Figura 2.3 – Barragem de Bemposta: corte (Lencastre, 2001).	6
Figura 2.4- Concha de rolo sem blocos (Pinheiro, 2006).	7
Figura 2.5- Concha de rolo com blocos (Pinheiro, 2006).	7
Figura 2.6- Exemplo de uma bacia de dissipação por macrorugosidades [2].	8
Figura 2.7 – Esquema da bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1983).	9
Figura 2.8 – Exemplo de uma bacia de dissipação por impacto (Sousa, 2011).	9
Figura 2.9- Identificação dos processos físicos responsáveis pela formação da fossa de erosão (Adaptado de Bollaert e Schleiss (2003)).	11
Figura 2.10- 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)).	11
Figura 2.11- Barragem de Santa Luzia, sistema de dissipação por queda livre [3].	12
Figura 2.12- Escoamento afogado (Adaptado de Sinniger e Hager (1989)).	13
Figura 2.13- Escoamento desafogado (Adaptado de Sinniger e Hager (1989)).	13
Figura 2.14- Barragem de Picote, sistema de dissipação por salto esqui [4].	14
Figura 2.15- Perfil de erosão da barragem de Picote (Melo, 2002).	14
Figura 2.16- Barragem do Alqueva, sistema de dissipação por jatos cruzados [5].	15
Figura 2.17- Esquema de um trampolim em salto de esqui.	16
Figura 2.18 – Vista em planta da secção de restituição.	16
Figura 2.19- Ângulos de saída de um jato em queda livre.	18
Figura 2.20- Determinação do alcance teórico do jato (Martins, 1973).	18
Figura 2.21- Determinação do ângulo de incidência teórico, α' (Martins, 1973).	19
Figura 2.22- Determinação do alcance efetivo do jato - (A) Gun'ko et al; (B) Taraimovich (Lencastre, 2001).	20
Figura 2.23- Determinação do alcance efetivo do jato – Kawakami (Martins, 1973).	21
Figura 2.24- Determinação do alcance efetivo do jato (Adaptado de Whittaker e Schleiss (1984)).	22
Figura 3.1- Esquema da instalação experimental utilizada (Adaptado de Figueiredo (2010)).	37
Figura 3.2 – Reservatórios de alimentação superior (R_1) e inferior (R_2).	38
Figura 3.3 – Instalação experimental.	38
Figura 3.4- Esquema do trampolim em salto esqui com $\alpha = 25^\circ$ (medidas em centímetros).	39
Figura 3.5 – Bacia de restituição e reservatório de bombagem, R_4 .	40

Figura 3.6- Curva granulométrica do material granular utilizado nos ensaios experimentais.	40
Figura 3.7 – Caudalímetro electromagnético.	43
Figura 3.8- Sequência de fotografias do jato obtidas para um dos ensaios experimentais.	45
Figura 3.9- Imagem do jato médio obtida através do código escrito em Matlab, a partir das imagens da Figura 3.8.	45
Figura 3.10- Trajetórias superior, média e inferior ($\alpha=20^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=3\text{cm}$).	47
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.	47
Figura 3.12- Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos e medidos - Método a) medição do alcance através do GIMP; Método b) medição do alcance através das coordenadas da trajetória.	48
Figura 3.13- Exemplo de seleção do ponto no perfil de intensidade- metodologia b) ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$).	49
Figura 3.14- Localização do ponto selecionado através do procedimento apresentado na Figura 3.13.	50
Figura 3.15- Definição do limite de integração – metodologia c) ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$). ...	50
Figura 3.16- Relação entre o alcance teórico e o alcance medido para os diferentes métodos de determinação de h_0	51
Figura 3.17- Modo de fixação da régua utilizada para o levantamento do perfil longitudinal da escavação de erosão.	52
Figura 3.18- Esquema com as variáveis necessárias para o cálculo das profundidades da fossa de erosão.	52
Figura 3.19 – Molde, em gesso, da escavação resultante ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$).	53
Figura 3.20 - Molde, em gesso, da escavação resultante ($\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$).	54
Figura 3.21- Comparação entre os caudais lidos diretamente no caudalímetro e os caudais medidos cm recurso ao reservatório calibrador.	57
Figura 3.22- Curva de calibração.	57
Figura 3.23 – Exemplo de uma imagem de calibração.	58
Figura 4.1 – Escavação sem realimentação ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$).	60
Figura 4.2 – Escavação com realimentação ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,99 \text{ L/s}$ e $h = 3 \text{ cm}$).	60
Figura 4.3- Representação gráfica das trajetórias do jato ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71 \text{ L/s}$).	64
Figura 4.4- Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI.	65
Figura 4.5- Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI.	65
Figura 4.6- Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha = 20^\circ$ e $Q = 0,71 \text{ L/s}$	66

Figura 4.7- Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha = 25^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s.	67
Figura 4.8- Comparação dos perfis de escavação para $Q = 0,51$ L/s com Figueiredo (2010).	67
Figura 4.9- Comparação dos perfis de escavação para $Q = 0,71$ L/s com Figueiredo (2010).	68
Figura 4.10- Comparação dos perfis de escavação para $Q = 0,85$ L/s com Figueiredo (2010).	68
Figura 4.11- Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 20^\circ$ e $h = 3$ cm.	69
Figura 4.12- Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 25^\circ$ e $h = 3$ cm.	70
Figura 4.13 – Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 20^\circ$ e $h = 5$ cm.	71
Figura 4.14 - Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 25^\circ$ e $h = 5$ cm.	71
Figura 4.15- Comparação das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para $Q = 0,71$ L/s.	73
Figura 4.16- Comparação das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para $Q = 0,85$ L/s.	73
Figura 4.17- Representação gráfica das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para os diferentes ângulos de saída do trampolim.	74
Figura 4.18- Afogamento do escoamento antes do salto de esqui ($\alpha = 45^\circ$).	75
Figura 4.19- Comparação das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$	75
Figura 4.20- Representação gráfica dos valores da profundidade máxima de escavação, f , obtidos experimentalmente e relação empírica entre os valores de f e H	77
Figura 4.21- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q = 0,71$ L/s).	80
Figura 4.22- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q = 0,71$ L/s).	81
Figura 4.23- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q = 0,71$ L/s).	82
Figura 4.24- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e grupo V ($Q = 0,71$ L/s).	84
Figura 4.25- Representação das profundidades máximas experimentais e das previstas pela aplicação da expressão de Mason & Arumugam (1985), em função do caudal escoado.	84
Figura 4.26- Ajuste das curvas aos dados experimentais.	85
Figura 4.27- Representação das profundidades máximas experimentais e das previstas pela aplicação da expressão de Chian Min Wu (1973), em função do caudal escoado.	86
Figura 4.28- Representação das profundidades máximas experimentais e das previstas pela aplicação da expressão de Yildiz & Uzupek (A) (1994), em função do caudal escoado.	86
Figura 4.29- Comparação entre os valores de f obtidos no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010) - grupo I.	87
Figura 4.30- Comparação entre os valores de f obtidos pelas expressões do grupo I no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010).	88

Figura 4.31- Comparação entre os valores de f obtidos pelas expressões do grupo II no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010).	88
Figura 4.32- Comparação entre os valores de f obtidos no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010) – grupo III.	89
Figura 4.33- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Mason & Arumugam (1985), para os diferentes valores de α .	90
Figura 4.34- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Chian Min Wu (1973), para os diferentes valores de α .	91
Figura 4.35- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Yildiz & Uzuçek (A) (1994), para os diferentes valores de α .	91
Figura 4.36- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Damle (A) (1966), para os diferentes valores de α .	92
Figura 4.37- Dimensões em planta da escavação ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).	93
Figura 4.38- Representação gráfica dos valores da largura da escavação para $\alpha = 20^\circ$.	95
Figura 4.39 – Representação gráfica dos valores da largura da escavação para $\alpha = 25^\circ$.	96
Figura 4.40- Comparação entre os valores experimentais de B_s para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$.	96
Figura 4.41 - Representação gráfica dos valores da extensão da escavação para $\alpha = 20^\circ$.	97
Figura 4.42 - Representação gráfica dos valores da extensão da escavação para $\alpha = 25^\circ$.	97
Figura 4.43 - Comparação entre os valores experimentais de L_s para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$.	98
Figura 4.44- Configuração 3D para a condição $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm.	98
Figura 4.45 – Contorno da escavação para $z = 0$ ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).	99
Figura 4.46 - Configuração 3D para a condição $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm.	99
Figura 4.47 – Contorno da escavação para $z = 0$ ($\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).	100
Figura 4.48 – Modelo 3D da escavação – vista de frente (Molde, em gesso, da escavação resultante ($\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm)).	100
Figura 4.49 – Evolução da erosão ao longo do tempo (em horas).	101
Figura 4.50 – Posição máxima da barra no eixo dos xx , em função do tempo (h).	102
Figura 4.51 – Velocidade de evolução da barra (m/h).	102
Figura A.1 – Esquema do trampolim em salto de esqui com $\alpha = 20^\circ$ (medidas em centímetros).	115
Figura A.2 – Esquema do trampolim em salto de esqui com $\alpha = 30^\circ$ (medidas em centímetros).	116
Figura A.3 – Esquema do trampolim em salto de esqui com $\alpha = 45^\circ$ (medidas em centímetros).	116
Figura D.1 - Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 25^\circ$.	126
Figura D.2 - Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 25^\circ$.	126

Figura D.3 - Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha=30^\circ$.	127
Figura D.4 - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha=30^\circ$.	127
Figura D.5 - Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha=45^\circ$.	128
Figura D.6 - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha=45^\circ$.	128
Figura E.1 - Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha=20^\circ$ e $Q=0,51\text{L/s}$.	142
Figura E.2 - Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha=20^\circ$ e $Q=0,85\text{L/s}$.	142
Figura E.3 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha=25^\circ$ e $Q=0,85\text{L/s}$.	143
Figura E.4 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha=30^\circ$ e $Q=0,71\text{L/s}$.	143
Figura E.5 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha=30^\circ$ e $Q=1,1\text{L/s}$.	144
Figura E.6- Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha=45^\circ$ e $Q=0,71\text{L/s}$.	144
Figura E.7 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha=45^\circ$ e $Q=1,19\text{L/s}$.	145
Figura E.8 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h=1\text{cm}$ e $\alpha=20^\circ$.	146
Figura E.9 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h=1\text{cm}$ e $\alpha=25^\circ$.	146
Figura E.10 -Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h=5\text{cm}$ e $\alpha=30^\circ$.	147
Figura E.11 -Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h=5\text{cm}$ e $\alpha=45^\circ$.	147
Figura F.1 -Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q=0,51\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).	151
Figura F.2 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).	151
Figura F.3 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q=0,51\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).	152
Figura F.4 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).	152
Figura F.5 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q=0,51\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).	153
Figura F.6 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).	153

Figura F.7 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q=0,51\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).....	154
Figura F.8 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=20^\circ$).....	154
Figura F.9 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q=0,71\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	156
Figura F.10 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	156
Figura F.11 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q=0,71\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	157
Figura F.12 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	158
Figura F.13 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q=0,71\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	159
Figura F.14 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	159
Figura F.15 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q=0,71\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	160
Figura F.16 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q=0,85\text{L/s}$ e $\alpha=25^\circ$).....	160
Figura G.1 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,51\text{L/s}$ e $h=1\text{cm}$	167
Figura G.2 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,51\text{L/s}$ e $h=3\text{cm}$	167
Figura G.3 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,51\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	168
Figura G.4 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=1\text{cm}$	168
Figura G.5 – $\alpha=20^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	169
Figura G.6 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,85\text{L/s}$ e $h=1\text{cm}$	169
Figura G.7 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,85\text{L/s}$ e $h=3\text{cm}$	170
Figura G.8 - $\alpha=20^\circ$, $Q=0,85\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	170
Figura G.9 - $\alpha=25^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=1\text{cm}$	171
Figura G.10 - $\alpha=25^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=3\text{cm}$	171
Figura G.11 - $\alpha=25^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	172
Figura G.12 - $\alpha=25^\circ$, $Q=0,85\text{L/s}$ e $h=1\text{cm}$	172
Figura G.13 - $\alpha=25^\circ$, $Q=0,85\text{L/s}$ e $h=3\text{cm}$	173
Figura G.14 - $\alpha=25^\circ$, $Q=0,85\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	173
Figura G.15 - $\alpha=30^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	174
Figura G.16 - $\alpha=30^\circ$, $Q=1,1\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	174

Figura G.17 - $\alpha=45^\circ$, $Q=0,71\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	175
Figura G.18 - $\alpha=45^\circ$, $Q=1,19\text{L/s}$ e $h=5\text{cm}$	175

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Definição das variáveis necessárias à análise do jato e caracterização da escavação de erosão das Figuras 2.17 e 2.18.....	17
Quadro 2.2- Limites de validade da equação (2.7).....	21
Quadro 2.3- parâmetros para aplicação das equações (2.9) e (2.10).....	24
Quadro 2.4- Limites de aplicação das equações.....	34
Quadro 2.5 – Limites de aplicação da equação de Ghodsian (B) (2012) – expressões (2.51) a (2.54).	34
Quadro 3.1- Dimensões características do material granular utilizado.....	41
Quadro 3.2- Razões de escala, λ , segundo a semelhança de Froude.....	42
Quadro 3.3- Valores de h_0 e L_e para as três metodologias.....	51
Quadro 3.4- Valores do parâmetro T para os diferentes modelos de trampolim utilizados.....	53
Quadro 3.5 – Características das escalas de medição utilizadas.....	55
Quadro 3.6- Registo dos intervalos de tempo, em segundos, para o enchimento de 20 L no reservatório.....	55
Quadro 3.7- Valores dos caudais relativos aos intervalos de tempo apresentados no quadro 3.6.	55
Quadro 3.8- Valores lidos diretamente no visor do medidor de caudais.....	56
Quadro 3.9- Valores médios e desvio padrão dos valores registados, em volt, com recurso ao software LabView 8.6.....	57
Quadro 4.1- Condições de teste.....	61
Quadro 4.2- Variáveis necessárias para aplicação das expressões (2.1) e (2.2).....	63
Quadro 4.3 – Valores dos ângulos associados aos declives da escavação a montante e a jusante da barra, θ_1 e θ_2 , respetivamente.....	72
Quadro 4.4- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 20^\circ$	76
Quadro 4.5- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 25^\circ$	76
Quadro 4.6- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 30^\circ$	77
Quadro 4.7- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 45^\circ$	77
Quadro 4.8- Profundidades máximas obtidas- Grupo I (medidas em cm).....	79
Quadro 4.9- Profundidades máximas obtidas- Grupo II (medidas em cm).....	80
Quadro 4.10- Profundidades máximas obtidas- Grupo III (medidas em cm).....	82
Quadro 4.11- Profundidades máximas obtidas- Grupo IV e V (medidas em cm).....	83
Quadro 4.12- Comparação dos valores de L^* , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).....	94
Quadro 4.13- Comparação dos valores de B_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).....	94

Quadro 4.14- Comparação dos valores de L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).....	94
Quadro 4.15 Comparação dos valores de L^* , B_s e L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 45^\circ$ (medidas em cm).....	95
Quadro 4.16 – Volume da escavação, em litros.....	101
Quadro B.1- Dados relativos à análise granulométrica realizada.....	117
Quadro C.1- Fatores de calibração.....	119
Quadro D.1-Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 20^\circ$	121
Quadro D.2- Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 25^\circ$	122
Quadro D.3 - Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 30^\circ$	123
Quadro D.4 - Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 45^\circ$	124
Quadro D.5 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 20^\circ$	125
Quadro D.6 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 25^\circ$	125
Quadro D.7 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 30^\circ$	126
Quadro D.8 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 45^\circ$	127
Quadro E.1 – Valores de f para $Q = 0,51$ L/s ($\alpha = 20^\circ$) (medidas em m).....	129
Quadro E.2 - Valores de f para $Q = 0,71$ L/s ($\alpha = 20^\circ$) (medidas em m).....	130
Quadro E.3 - Valores de f para $Q = 0,85$ L/s ($\alpha = 20^\circ$) (medidas em m).....	132
Quadro E.4 - Valores de f para $Q = 0,71$ L/s ($\alpha = 25^\circ$) (medidas em m).....	134
Quadro E.5 - Valores de f para $Q = 0,85$ L/s ($\alpha = 25^\circ$) (medidas em m).....	136
Quadro E.6 - Valores de f para $\alpha = 30^\circ$ (medidas em m).....	138
Quadro E.7 - Valores de f para $\alpha = 45^\circ$ (medidas em m).....	140
Quadro F.1 - Valores dos caudais descarregados.....	149
Quadro F.2 – Valores da altura de queda para $\alpha = 20^\circ$	149
Quadro F.3 - Valores da altura de queda para $\alpha = 25^\circ$	150
Quadro F.4 - Valores da altura de queda para $\alpha = 30^\circ$	150
Quadro F.5 - Valores da altura de queda para $\alpha = 35^\circ$	150
Quadro F.6 – Dimensões características do material granular utilizado.....	150
Quadro F.7 – Valores do raio do trampolim para os diferentes ângulos de saída.....	150
Quadro F.8 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo I (medidas em cm).....	155
Quadro F.9 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo II (medidas em cm).....	157

Quadro F.10 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo III (medidas em cm)	158
Quadro F.11 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo IV e V (medidas em cm)	160
Quadro F.12 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo I (medidas em cm)	161
Quadro F.13 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo II (medidas em cm)	161
Quadro F.14 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo III (medidas em cm)	162
Quadro F.15 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo IV e V (medidas em cm)	162
Quadro F.16 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo I (medidas em cm)	163
Quadro F.17 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo II (medidas em cm)	164
Quadro F.18 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo III (medidas em cm)	164
Quadro F.19 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo IV e V (medidas em cm)	164
Quadro G.1 - Comparação dos valores de L^* , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 25^\circ$ (medidas em cm).....	165
Quadro G.2 - Comparação dos valores de B_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 25^\circ$ (medidas em cm).....	165
Quadro G.3- Comparação dos valores de L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).....	165
Quadro G.4 - Comparação dos valores de L^* , B_s e L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 30^\circ$ (medidas em cm).....	166

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

B – largura da bacia de restituição [m]

b – largura do trampolim em salto esqui [m]

b_0 – espessura do jato na secção inicial (expressão 2.27) [m]

B_s – largura da escavação de erosão [m]

CU – coeficiente de uniformidade da areia [-]

d – dimensão característica do material do leito [m]

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

D_1 – altura conjugada de montante [m]

D_2 – altura conjugada de jusante [m]

D_{90}^* - diâmetro adimensional da partícula [-]

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^2]

H - altura de queda total [m]

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

H'_0 – desnível entre o nível de água a montante e o eixo da secção considerada [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 pixéis 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) [-]

n_1 - fator corretivo da expressão (2.33) [-]

P - parâmetro que representa a resistência à erosão oferecida pelo material do leito [-]

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]

U_e - velocidade mínima requerida para que o ar se entranhe na água [m/s]

W - velocidade de queda das partículas (expressão 2.27) [m/s]

W_m - velocidade de queda da partícula média (expressão 2.53) [m/s]

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]

α - ângulo de saída do trampolim em salto de esqui [°]

α' - ângulo de incidência do jato com o colchão de água [°]

α'_{medido} - ângulo de incidência do jato com o colchão de água medido através da técnica de aquisição de imagens [°]

α'_t - ângulo de incidência teórico do jato no colchão de água [°]

α_1 - ângulo da superfície livre no bordo de saída num jato em queda livre [°]

α_2 - ângulo formado pela tangente à soleira num jato em queda livre [°]

β - parâmetro que representa a % de ar existente na água [-]

β_x, β_y - fatores lineares de calibração horizontal e vertical, respetivamente [cm/px]

γ - peso específico da água [N/m^3]

γ_0 - peso específico da água tendo em consideração a emulsão de ar [N/m^3]

γ_s - peso específico da partícula do material do leito [N/m^3]

η - quociente entre a velocidade máxima instantânea, pela velocidade média, num dado ponto (expressão 2.27) [-]

θ_1 - ângulo formado pela escavação a montante da barra de erosão com a horizontal [°]

θ_2 - ângulo formado a jusante da barra de erosão com a horizontal [°]

λ_{Fr} - relação de escala segundo a semelhança de Froude [-]

λ_L - fator de escala geométrico [-]

ρ - massa volúmica da água [kg/m³]

ρ_s - massa volúmica da partícula do material do leito [kg/m³]

φ - coeficiente de perda de carga [-]

CFD - Dinâmica de fluidos computacional, do inglês "Computational Fluid Dynamics"

HRHA - Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

TAI - Técnica de aquisição de imagens

USBR - United States Bureau of Reclamation

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS

Os desenvolvimentos científicos realizados em diferentes áreas, nomeadamente, do cálculo estrutural, dos materiais de construção e do aparecimento de centrais hidroelétricas permitiram a construção de barragens de dimensões cada vez maiores. No início do século XX a barragem de New Croton, que, segundo Sorensen foi a primeira a ser construída com o objetivo de dissipar energia (Almeida, 2014), era a que apresentava a maior altura de queda do mundo, à data da sua construção (91 m). Atualmente a maior barragem é a das Três Gargantas com uma cota de 185 m e uma capacidade da albufeira de aproximadamente 39 km³.

Deste modo, com o acréscimo de energia potencial, surge a necessidade de dissipar uma maior quantidade de energia cinética durante a descarga dos caudais de cheia. A solução encontrada por Coyne (Melo, 2002) 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.

A este tipo de dissipação de energia associa-se também o facto de, em muitas situações, não ser necessária a construção de uma estrutura de dissipação, tornando a construção da barragem mais económica. Nestes casos o leito vai sendo erodido devido à ação do jato originando uma escavação a jusante da estrutura hidráulica. 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 análise.

Este estudo surge com o intuito de dar continuidade ao estudo realizado por Figueiredo (2010) e tem como objetivo caracterizar e analisar, por via experimental, a erosão resultante da ação de um jato proveniente de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui. Para tal, utilizou-se o modelo reduzido do descarregador de cheias disponível no laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

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. Numa primeira fase 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 esses resultados com os obtidos pela aplicação de expressões empíricas e semiempíricas, bem como com estudos realizados anteriormente, nomeadamente com o realizado por Figueiredo (2010).

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, organizados segundo uma lógica sequencial, os quais são aqui descritos de forma sucinta.

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

A exposição dos conceitos teóricos relacionados com dissipação de energia, e que resultaram da pesquisa bibliográfica realizada, é apresentada no capítulo 2. Neste mesmo capítulo descrevem-se os diferentes tipos de bacia de dissipação de energia, dando especial atenção à dissipação de energia por jatos. Apresentam-se igualmente várias expressões sugeridas por diversos autores que servirão de base para a previsão das profundidades máximas de escavação, realizada no capítulo 4.

No capítulo 3 a instalação experimental é descrita conjuntamente com os equipamentos de medição utilizados e os respetivos processos de calibração. Os procedimentos e critérios adotados nas diferentes técnicas de medição são também debatidos neste capítulo.

O capítulo 4 é reservado à apresentação dos resultados obtidos experimentalmente, à sua análise crítica e à comparação entre estes com os valores previstos pela aplicação de expressões sugeridas por vários autores e também com os valores obtidos no estudo levado a cabo por Figueiredo (2010). Realiza-se também uma análise da influência do ângulo de saída do trampolim e do tempo no desenvolvimento da escavação de erosão.

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

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DISSIPACÃO DE ENERGIA

A construção de um aproveitamento hidráulico num curso de água, nomeadamente a construção da barragem, poderá originar uma diferença significativa entre as superfícies livres da água a montante e jusante da estrutura hidráulica. Esta diferença de carga hidráulica implica a existência de uma perda de carga significativa durante a descarga dos caudais de cheia, uma vez que as características do escoamento na restituição devem ser o mais semelhantes possível às características do escoamento do curso de água natural, isto é, antes da construção da referida obra de retenção.

Dado que a perda de energia ao longo dos descarregadores de cheias convencionais é, em geral, bastante reduzida, será necessário proceder à dissipação da energia em excesso na zona a jusante do descarregador. Os descarregadores não convencionais, como os descarregadores em degraus, permitem uma maior dissipação de energia ao longo do próprio descarregador. No entanto, tal como acontece nos descarregadores convencionais, torna-se necessário estimar a energia em excesso que terá de ser dissipada a jusante do descarregador (Novak, 2007).

A dissipação de energia em excesso pode ser realizada por diferentes mecanismos:

- Turbulência do escoamento
- Atrito do escoamento com as fronteiras
- Atrito e emulsão dos jatos com o ar e dos jatos entre si
- Impacto e atrito de jatos com o colchão de água a jusante

A zona onde se dá a dissipação de energia fica suscetível à ocorrência de erosões devido à elevada turbulência do escoamento verificada durante o processo. Por este motivo, para que a restituição ocorra de forma segura é necessário proceder à proteção da zona em questão, recorrendo não só à construção de estruturas de dissipação bem como a obras de estabilização do leito e das margens.

Nos casos em que não se consegue evitar a ocorrência de erosões, deverá garantir-se que estas ocorrem o mais afastado possível do pé da barragem, para que a sua estabilidade não fique comprometida.

Dos meios de dissipação de energia anteriormente mencionados, a turbulência do escoamento é aquele que se apresenta como o fator mais importante no processo de dissipação (Pinheiro, 2006). O fenómeno de turbulência é caracterizado como a transformação de energia cinética em energia interna. O escoamento turbulento origina a formação de grandes turbilhões sendo estes responsáveis pela transferência da energia cinética. A interferência entre turbilhões fará com que estes se tornem sucessivamente mais pequenos, terminando o processo quando as dimensões dos turbilhões forem

demasiado pequenas para que haja transferência de energia. Os turbilhões dissipam-se então por atrito viscoso e a energia cinética por eles transmitida é transformada em calor (Carvalho, 2015).

O processo de turbulência descrito está presente na formação do ressalto hidráulico, no cruzamento de jatos entre si e também no impacto dos jatos com a lâmina de água a jusante.

No entanto, este processo poderá originar problemas nas fronteiras do escoamento devido às flutuações de pressão verificadas, destacando-se as seguintes (Carvalho, 2015):

- Cavitação:
Ocorre quando existe uma descida repentina da pressão local, tornando-se inferior à pressão mínima em que ocorre a vaporização do líquido. Pode ser evitada através do arejamento do escoamento e também da utilização de uma geometria adequada dos contornos.
- Vibração:
É originada pela natureza turbulenta do escoamento, podendo ser evitada recorrendo ao arejamento da veia líquida e também à divisão dos jatos, dado que os turbilhões assim formados serão de menor dimensão.
- Escavações:
São devidas às variações de pressão, pois estas fazem com que os sedimentos sejam levantados e posteriormente transportados. Pode ser evitado através da proteção da zona em questão.
- Ações hidrodinâmicas importantes sobre os contornos do escoamento.

2.2. TIPOS DE ÓRGÃOS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

Como se referiu anteriormente, a perda de energia pode ser conseguida através de diversos meios, existindo, por isso, diferentes tipos de órgãos de dissipação de energia.

A escolha de um tipo de dissipação em detrimento de outro está diretamente relacionada com o tipo de aproveitamento, com os valores dos caudais de cheia a escoar e também com as características topográficas e geológicas do local onde se vai proceder à construção do aproveitamento hidráulico.

É de notar que, pela sua eficácia no processo de dissipação de energia da descarga de caudais de cheia, os órgãos de dissipação por jatos e também as bacias de dissipação baseados na teoria do ressalto hidráulico são, geralmente, os mais utilizados (Carvalho, 2015).

No entanto, existem outros tipos de bacia de dissipação como a dissipação de energia por trampolim submerso, dissipação de energia por meio de macrorrugosidades e bacia de dissipação por impacto.

Nas secções seguintes são apresentadas as características dos diferentes órgãos de dissipação mencionados, com especial destaque para a bacia de dissipação por jatos, nomeadamente, por meio de um trampolim em salto de esqui, por ser a utilizada no presente estudo.

2.2.1. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico (Figura 2.1) é um tipo de escoamento que promove a transição de um escoamento em regime rápido, com altura conjugada D_1 , para um escoamento em regime lento, com altura conjugada D_2 , ao longo de um comprimento “ L ”, designado comprimento do ressalto. Este fenómeno envolve um elevado grau de turbulência, que é responsável por uma perda significativa de energia existente no escoamento. Outra parte da energia é dissipada devido ao atrito do escoamento com as fronteiras (Pinheiro, 2006).

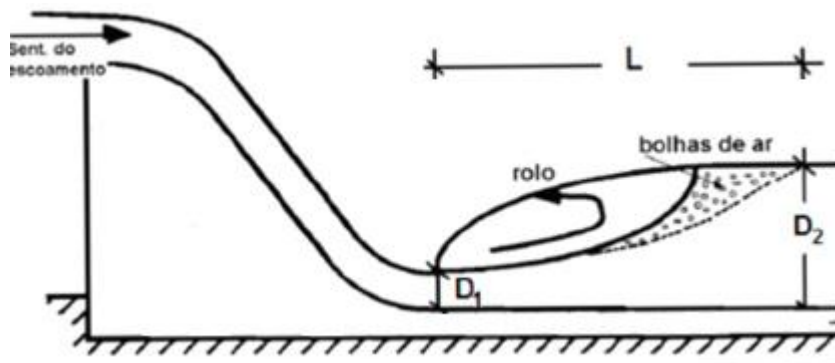


Figura 2.1- Formação do ressalto hidráulico (Adaptado de Sousa (2011)).

O dimensionamento das bacias de dissipação por ressalto hidráulico consiste na definição da geometria da bacia, nomeadamente do seu comprimento, em função do comprimento do ressalto, bem como na definição da cota da soleira, que deve ser fixada de modo a que se verifiquem as condições necessárias para a ocorrência do ressalto no interior da bacia. O nível de água a jusante da bacia de dissipação está fortemente relacionado com a definição da cota da soleira, uma vez que deverá ser igual ou, na pior das hipóteses, superior ao nível de água na bacia de dissipação.

O recurso a soleiras munidas de acessórios, realizados em betão, permite reduzir o comprimento do ressalto e, por isso, o comprimento da bacia de dissipação. Segundo o *United States Bureau of Reclamation* (USBR) existem quatro tipos de bacias, em função do tipo de acessórios utilizados (Peterka, 1983).

- Tipo I – sem acessórios
- Tipo II – blocos de queda e soleira terminal com dentes
- Tipo III – blocos de queda, blocos de impacto e soleira terminal
- Tipo IV – blocos de queda e soleira terminal

A jusante da estrutura hidráulica o escoamento poderá ainda apresentar uma turbulência superior à existente em situações de escoamento natural bem como velocidades elevadas, resultantes de elevados caudais de descarga. Estas situações exigem que a zona em questão seja protegida, para evitar a erosão do leito. A solução adotada consiste, na maioria das situações, na aplicação de um tapete de enrocamento, também conhecido como filtro invertido (Pinheiro, 2006).

Nas Figuras 2.2 e 2.3 apresentam-se, respetivamente, uma fotografia e um corte da barragem de Bemposta, cuja dissipação de energia é realizada por ressalto hidráulico.



Figura 2.2 – Barragem de Bemposta, sistema de dissipação por ressalto hidráulico [1].

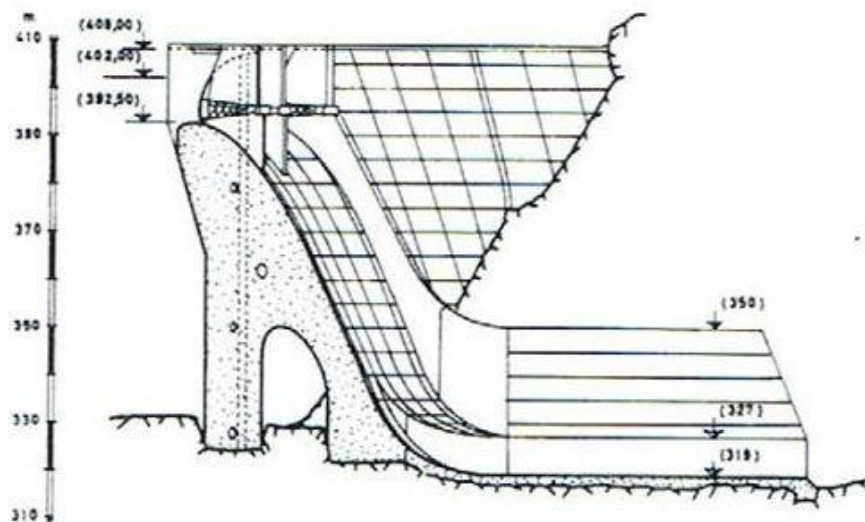


Figura 2.3 – Barragem de Bemposta: corte (Lencastre, 2001).

2.2.2. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO

Na situação em que existe tendência para a ocorrência de ressalto afogado, isto é, quando o nível de água a jusante é superior ao nível de água na soleira, é vantajoso optar-se pelo recurso à dissipação por trampolim submerso (*roller bucket*) (Ferreira, 2011).

A geometria do trampolim origina a formação de dois rolos (turbilhões) de eixo horizontal e com sentido de rotação contrários, sendo um formado sobre a concha e o outro a jusante da referida estrutura. A dissipação de energia ocorre precisamente devido à turbulência existente na formação dos rolos. O trampolim pode, ou não, ser provido de blocos (dentes), o que fará com que as características do escoamento sejam diferentes (Pinheiro, 2006).

No caso em que o trampolim não possui blocos, o escoamento é todo direcionado para cima, isto é, para a zona alta à saída do trampolim. Esta situação resulta na formação de um cachão na superfície da veia líquida e também num rolo a jusante com grandes dimensões e com uma maior intensidade (Figura 2.4).

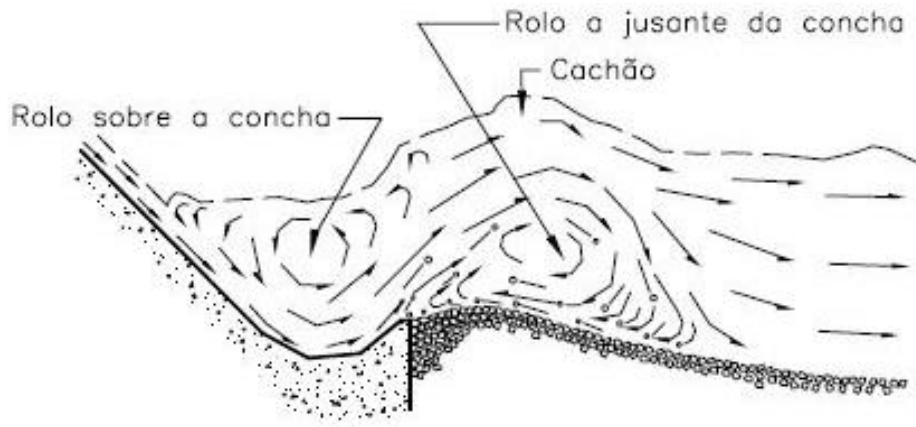


Figura 2.4- Concha de rolo sem blocos (Pinheiro, 2006).

Caso o dissipador seja equipado com blocos, o escoamento é dividido e apenas parte da veia líquida contribui para a formação do segundo rolo. Ao contrário da situação anterior, o rolo formado é de menores dimensões, sendo menor o transporte de sedimentos para montante (Figura 2.5).

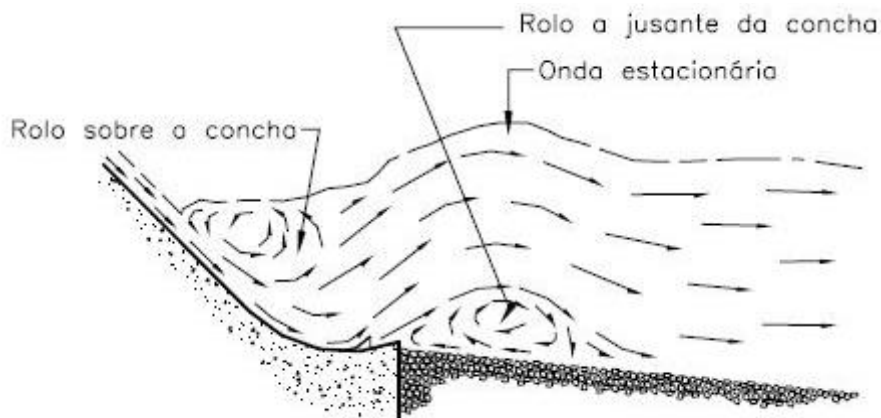


Figura 2.5- Concha de rolo com blocos (Pinheiro, 2006).

O dimensionamento do trampolim submerso consiste na definição do seu raio de curvatura bem como na definição da cota da geratriz inferior da concha.

2.2.3. BACIAS DE DISSIPACÃO POR MACRORRUGOSIDADES

A bacia de dissipação de energia por meio de macrorrugosidades é caracterizada pela existência de blocos ao longo de uma rampa, cuja geometria é em função do caudal de dimensionamento. Este tipo de estrutura é frequentemente utilizada em quedas existentes em canais (Sousa, 2011).

A existência dos blocos surge como um obstáculo ao escoamento, promovendo assim a dissipação de energia originada pelo desnível existente. Como se pode visualizar na Figura 2.6 os blocos são dispostos em filas, cujos espaçamentos não se encontram alinhados com os das filas vizinhas. Esse desfasamento faz com que não haja um aumento da aceleração do escoamento ao longo da rampa.

Se ao longo de duas filas consecutivas as características do escoamento se mantiverem, pode-se considerar, embora de forma não muito rigorosa, que o escoamento é “uniforme”. No entanto só se pode tomar esta conclusão se existir, no mínimo, 4 filas de blocos (Peterka, 1983).

É de notar que para um correto dimensionamento desta estrutura é necessário ter em conta diversos aspetos pré-definidos em função das características do escoamento, como a velocidade máxima na secção de entrada, o espaçamento transversal, altura e largura dos blocos, espaçamento entre filas de blocos, o declive da rampa, a altura dos muros, entre outros.

No caso de o canal não ser revestido, é fulcral a existência de um tapete de enrocamento a jusante da rampa de blocos, para evitar a erosão do leito na secção de restituição (Pinheiro, 2006).



Figura 2.6- Exemplo de uma bacia de dissipação por macrorrugosidades [2].

2.2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO

Este tipo de estrutura de dissipação é utilizada na saída de condutas sob pressão podendo, no entanto, ser utilizada na extremidade de condutas com escoamento em superfície livre, com alterações na configuração a montante.

A bacia de dissipação é constituída por uma caixa em betão munida com uma viga transversal em formato de “L” invertido (Figura 2.7). Esta estrutura tem a vantagem de não necessitar de um colchão de água mínimo a jusante para garantir o seu correto funcionamento. No entanto, de acordo com Peterka (1983), há uma diminuição da turbulência residual e, por consequência, uma diminuição da erosão a jusante se o nível de água for aproximadamente igual ao diâmetro da conduta acrescido de metade do valor da aceleração da gravidade.

A perda de energia é, neste caso, devida ao impacto do escoamento na viga em “L”, que se encontra na secção em frente à saída da conduta. Segundo Peterka (1983), se a inclinação da conduta for inferior a 15° , a placa de impacto deverá situar-se imediatamente a seguir, caso contrário, será necessário garantir um trecho horizontal correspondente a, aproximadamente, dois diâmetros.

À semelhança do referido para as restantes bacias de dissipação, é necessário prever a proteção do leito a jusante, recorrendo assim ao dimensionamento de um tapete de enrocamento (Pinheiro, 2006).

Na Figura 2.8 apresenta-se um exemplo de uma bacia de dissipação por impacto em funcionamento.

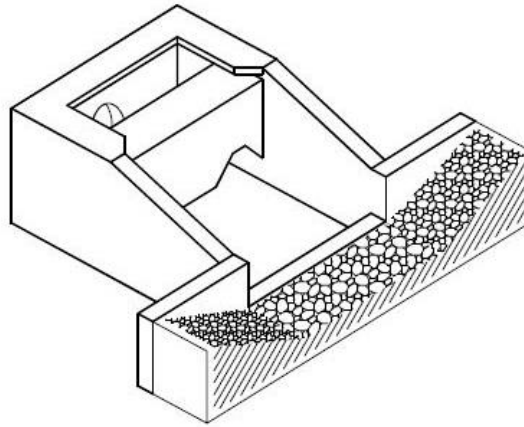


Figura 2.7 – Esquema da bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1983).



Figura 2.8 – Exemplo de uma bacia de dissipação por impacto (Sousa, 2011).

2.2.5. BACIAS DE DISSIPACÃO POR JATOS

A bacia de dissipação por jatos consiste na dissipação da energia através do impacto do jato na lâmina de água a jusante e, posteriormente no leito do rio. No caso de não existir colchão de água a dissipação é realizada diretamente no leito. O impacto do jato irá provocar, na zona de incidência, uma escavação devido à erosão. O recurso a este tipo de estruturas de dissipação mostra-se bastante vantajoso no caso em que as condições geológicas e morfológicas são favoráveis, ou seja, quando apresentam uma maior resistência à erosão. Nestes casos, à partida, não será necessário construir uma bacia de dissipação para proteger o leito, diminuindo assim os custos envolvidos na construção do aproveitamento.

No caso em que o material do leito for rochoso, a existência de diáclases fará com que o leito fique fragmentado em blocos, facilitando assim o seu levantamento devido às flutuações de pressão. O levantamento dos blocos ocorrerá quando as forças ascendentes forem superiores às forças descendentes, ou seja, quando a força originada pelas flutuações de pressão for superior ao peso submerso dos blocos, sendo posteriormente arrastados e depositados quando a velocidade do escoamento não for suficiente para que o seu transporte continue a ocorrer. Durante o transporte poderá haver fragmentação dos blocos devido à colisão entre vários blocos ou até mesmo devido à colisão com o leito. A fragmentação torna os blocos mais pequenos e, por isso, suscetíveis de serem transportados mais para jusante. A deposição dos blocos irá originar uma barra de sedimentos a jusante da escavação, sendo mais ou menos extensa consoante a dimensão dos blocos e a distância até à qual são transportados e depositados (Pinheiro, 2006).

Bollaert e Schleiss (2003) dividem este processo em seis passos, de acordo com o ilustrado na Figura 2.9.

- 1- Impacto do jato no colchão de água
- 2- Difusão turbulenta da lâmina de água
- 3- Flutuações de pressão na interface água-rocha
- 4- Propagação dessas pressões nas juntas do maciço e fracturação da rocha
- 5- Levantamento do bloco
- 6- Transporte do bloco para jusante e posterior deposição

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, do caudal descarregado e também das 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 2.10 representam-se os diferentes tipos de jatos de acordo com a classificação destes autores.

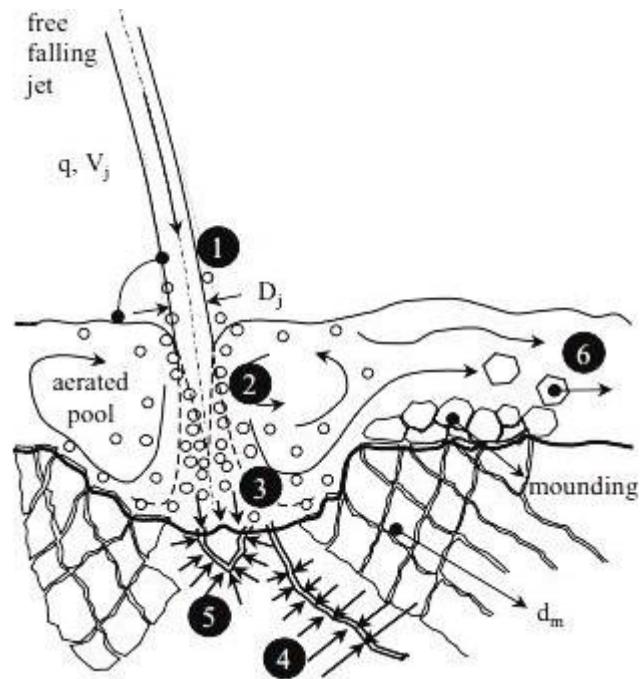


Figura 2.9- Identificação dos processos físicos responsáveis pela formação da fossa de erosão (Adaptado de Bollaert e Schleiss (2003)).

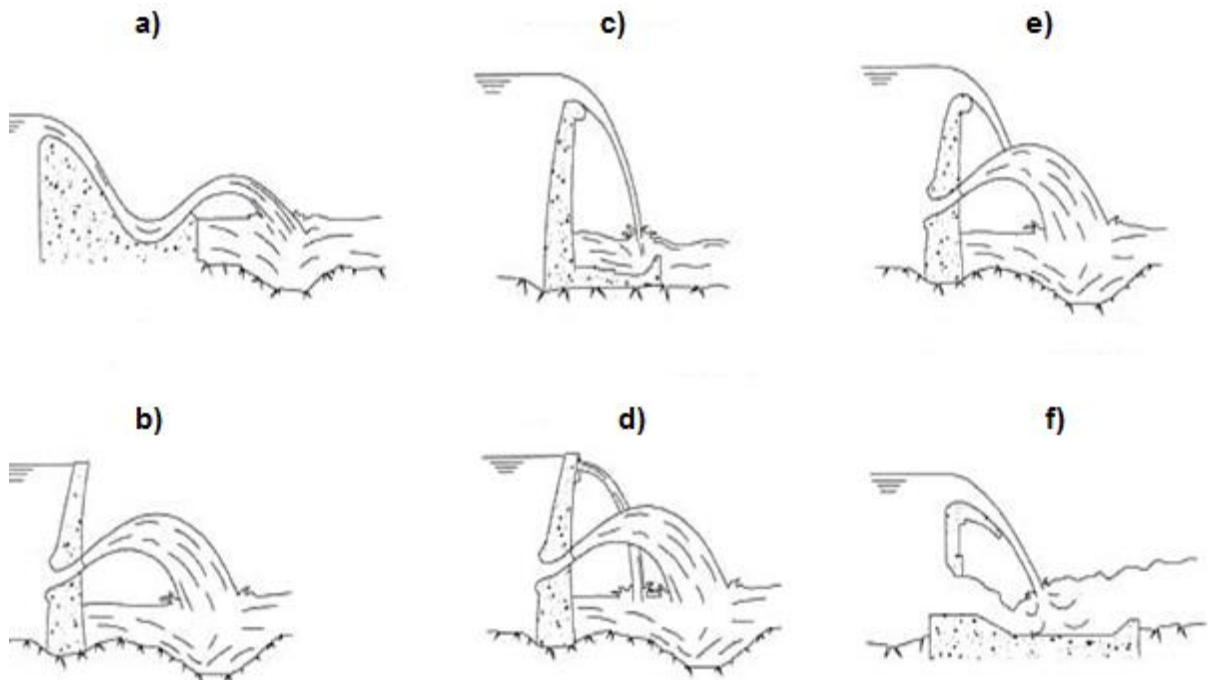


Figura 2.10- Classificação dos diferentes tipos de descarregadores por jatos: a) Salto esqui-trampolim; b) Salto esqui-orifícios; c) Lâmina Livre; d) Jatos combinados; e) Jatos cruzados- choque de jatos no ar; f) Jatos cruzados - ressalto hidráulico combinado com lâmina livre (Adaptado de Melo (2002)).

Os jatos denominados de lâmina livre caracterizam-se por ser descendentes e quase verticais, ocorrendo o seu impacto junto ao pé da barragem, onde existe uma significativa dissipação de energia cinética. Nestes casos deverá recorrer-se a um colchão de água de espessura conveniente para proteger o leito. A desintegração do jato reflete-se numa maior perda de energia ao longo da sua trajetória, devido ao seu atrito com o ar. Para isso, pode recorrer-se ao uso de blocos dispersores ou de pequenos defletores na secção de saída do jato (Melo, 2002).

Um exemplo desta aplicação é a barragem de Santa Luzia, localizada no concelho de Pampilhosa da Serra (Figura 2.11).



Figura 2.11- Barragem de Santa Luzia, sistema de dissipação por queda livre [3].

No caso dos trampolins em salto de esqui, o jato é projetado, segundo um determinado ângulo. Neste caso a dissipação de energia ocorre mais a jusante da estrutura (quando comparada com o sistema de queda livre). Este tipo de trampolim caracteriza-se pela sua forma côncava e pela existência de um defletor, responsável pela projeção do jato. O inconveniente associado ao uso deste tipo de descarregador prende-se ao facto de a dissipação de energia durante a trajetória aérea do jato ser pequena, implicando uma maior dissipação aquando do seu impacto no leito, originando 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, originando o afogamento do escoamento e consequentemente a ocorrência do fenómeno do ressalto hidráulico na extremidade de montante do trampolim, como se pode verificar na Figura 2.12. Este tipo de escoamento deve ser evitado, pois grande parte da energia é dissipada durante o processo de turbulência, refletindo-se num menor alcance do jato, o que fará com que a zona de incidência do jato se localize próximo da fundação da barragem, podendo colocar em risco a sua estabilidade (Sinniger e Hager, 1989).

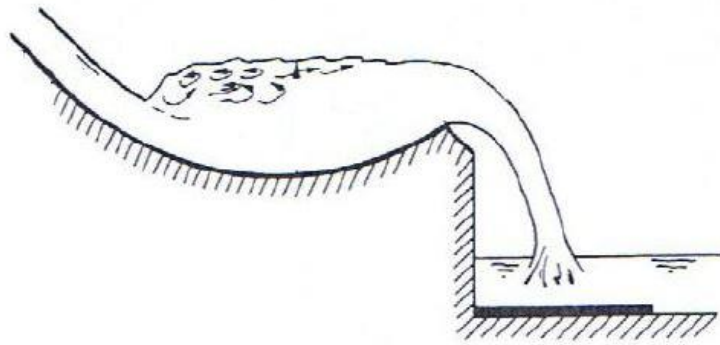


Figura 2.12- Escoamento afogado (Adaptado de Sinniger e Hager (1989)).

Para caudais descarregados mais elevados, o escoamento torna-se “desafogado” e é corretamente projetado, isto é, sob a forma de jato livre. O impacto do jato ocorre assim numa zona mais afastada da estrutura hidráulica, como está ilustrado na Figura 2.13.

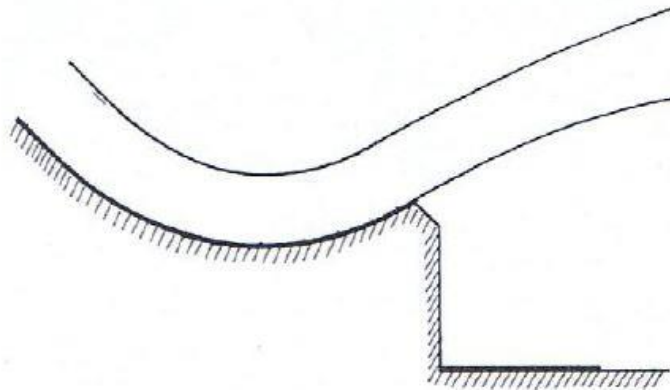


Figura 2.13- Escoamento desafogado (Adaptado de Sinniger e Hager (1989)).

No dimensionamento do trampolim em salto de esqui é importante ter em consideração alguns fatores 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, os aspetos relacionados com a cavitação bem como a geometria do trampolim na proximidade do ponto de descolamento do escoamento (Sinniger e Hager, 1989).

Nas Figuras 2.14 e 2.15 apresentam-se, respetivamente, uma fotografia e um corte da barragem de Picote, cuja dissipação de energia é realizada por jato em salto esqui.



Figura 2.14- Barragem de Picote, sistema de dissipação por salto esqui [4].

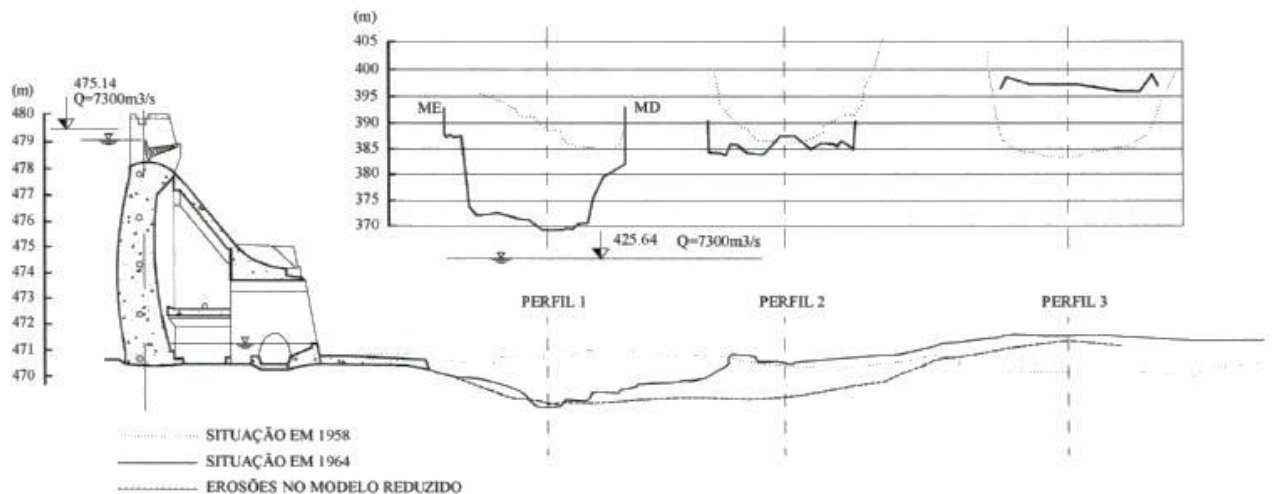


Figura 2.15- Perfil de erosão da barragem de Picote (Melo, 2002).

O recurso à dissipação de energia por jatos cruzados é essencial nos casos em que existe um valor considerável de energia a dissipar e também quando as características geológicas e morfológicas não se apresentam favoráveis. 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 se exemplifica na Figura 2.16. Este meio de dissipação também pode ocorrer nos descarregadores com ressalto hidráulico quando combinados com jatos de lâmina livre (Melo, 2002).



Figura 2.16- Barragem do Alqueva, sistema de dissipação por jatos cruzados [5].

A geometria do trampolim em salto esqui tem influência tanto na direção do jato, como no seu alcance e grau de desintegração. A opção por uma determinada configuração está relacionada com as condições locais, como as características do material do fundo e das margens.

2.3.DISSIPAÇÃO POR JATOS

2.3.1.DEFINIÇÕES GERAIS

O desenvolvimento da erosão pode comprometer a estabilidade da estrutura e das margens do rio. É, por isso, essencial conhecer as características do escoamento e as condições locais para que se possa proceder a uma análise da dissipação de energia por meio de jatos. Essa análise consiste na definição do alcance do jato (zona de incidência do jato) e na previsão das dimensões da escavação originada pela erosão, nomeadamente da profundidade máxima, largura e extensão.

Na Figuras 2.17 e 2.18 apresentam-se dois esquemas onde se encontram representadas as variáveis necessárias para a análise do alcance do jato bem como das dimensões da escavação: um corte de um trampolim em salto de esqui (Figura 2.17) e uma vista em planta da escavação (Figura 2.18). A definição das variáveis representadas nas duas figuras é apresentada no quadro 2.1.

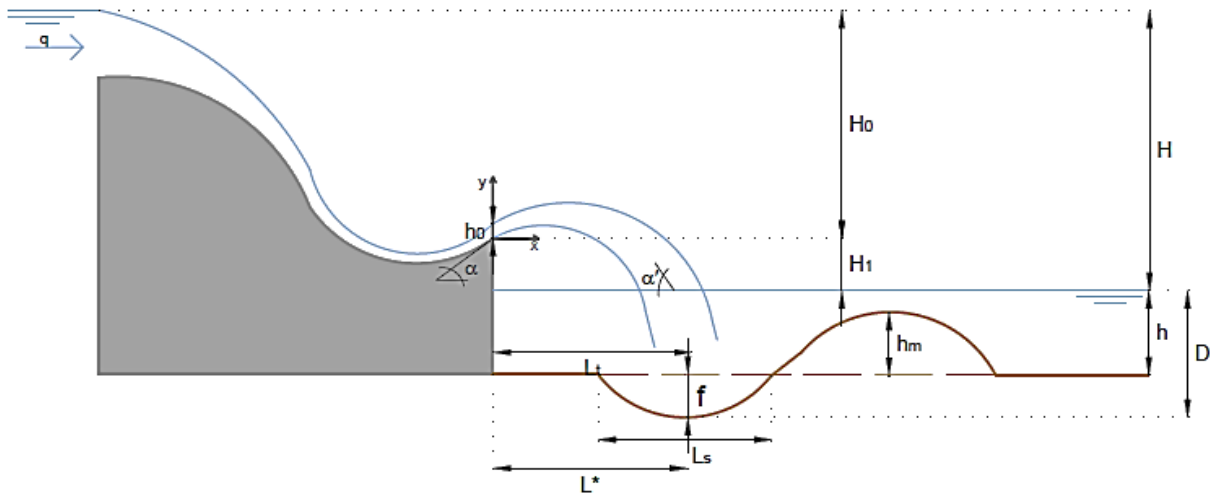


Figura 2.17- Esquema de um trampolim em salto de esqui.

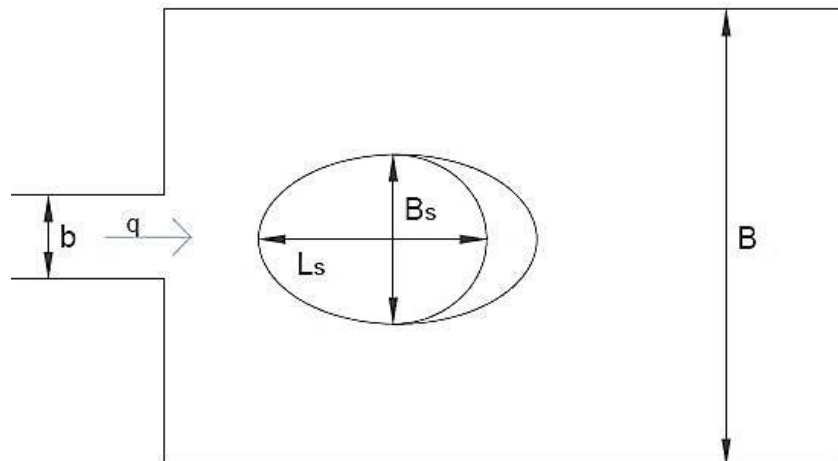


Figura 2.18 – Vista em planta da seção de restituição.

Quadro 2.1 – Definição das variáveis necessárias à análise do jato e caracterização da escavação de erosão das Figuras 2.17 e 2.18.

Variável	Definição
b	largura do trampolim em salto de esqui
B	largura da bacia de restituição
B_s	largura da escavação de erosão
D	profundidade máxima da escavação medida a partir da superfície livre a jusante
F	profundidade máxima da escavação medida a partir do nível inicial do leito
H	altura de queda total
H_0	altura de queda na secção de saída do trampolim
H_1	desnível entre secção de saída do trampolim em salto esqui e o colchão de água
h	espessura do colchão de água na bacia de restituição
h_0	altura do escoamento na secção de saída do trampolim em salto de esqui
h_m	altura da barra a jusante da fossa de erosão
L_s	extensão da escavação de erosão
L_t	alcance teórico do jato
L^*	distância, na horizontal, entre a secção de saída do trampolim e o ponto de profundidade máxima de erosão
q	caudal por unidade de largura
x, y	coordenadas da trajetória do jato
α	ângulo de saída do trampolim em salto de esqui
α'	ângulo de incidência do jato no colchão de água

2.3.2. ALCANCE E ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA TEÓRICOS

Admitindo que a origem do sistema de eixos ortogonais se encontra 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 2.17 e no quadro 2.1.

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

O alcance teórico do jato, tendo também em conta apenas considerações de ordem cinemática, é dado por:

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

em que H_0 é dado por:

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

Na presença de um descarregador em trampolim ou orifício, considera-se que o valor de α é dado pelo ângulo formado com a horizontal pela tangente à saída do trampolim na secção terminal. No caso de um jato em queda livre, toma-se como valor de α a média aritmética do valor do ângulo formado pela tangente à soleira, α_2 , e do valor do ângulo da superfície livre no bordo de saída, α_1 , conforme ilustrado no esquema da Figura 2.19.

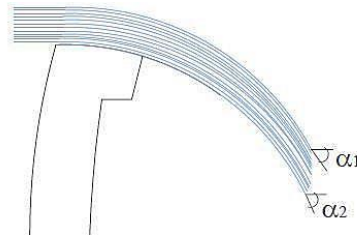


Figura 2.19- Ângulos de saída de um jato em queda livre.

O alcance teórico pode também ser determinado através do gráfico apresentado na Figura 2.20. Observando o ábaco conclui-se que, para valores de H_0/H , o alcance teórico máximo ocorre para valores de $\alpha = 45^\circ$.

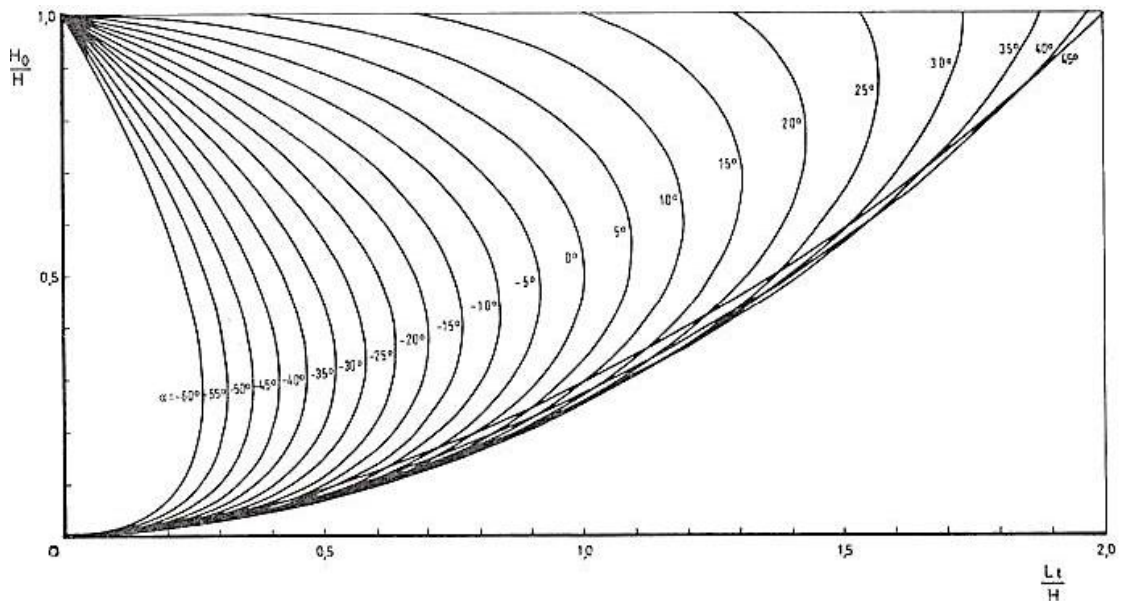


Figura 2.20- Determinação do alcance teórico do jato (Martins, 1973).

O ângulo de incidência teórico do jato, α' , está relacionado com o cálculo do alcance teórico e pode ser obtido a partir da equação da trajetória do jato. A definição das variáveis da expressão (2.4) é apresentada no quadro 2.1.

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

À semelhança do apresentado para o alcance teórico, também existe um ábaco que permite determinar o ângulo de incidência teórico através da relação entre o ângulo de saída do jato, α , e H_0/H . (Figura 2.21)

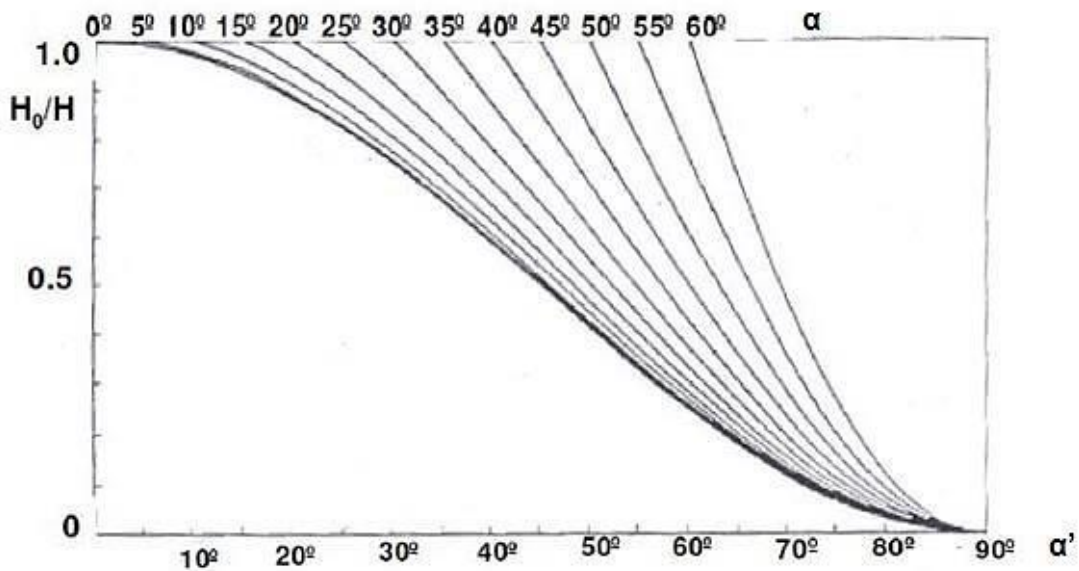


Figura 2.21- Determinação do ângulo de incidência teórico, α' (Martins, 1973).

2.3.3. 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.

O alcance efetivo do jato mostra-se mais importante no caso de jatos ascendentes, pois devido às flutuações turbulentas de velocidade, tensão superficial, viscosidade e emulsão com o ar, o jato dissipa energia, alterando assim a sua trajetória. Deste modo, a utilização da equação (2.2) para o cálculo do alcance do jato não é a mais adequada.

Para estes casos, isto é, para o caso de jatos provenientes de trampolins, vários autores desenvolveram fórmulas empíricas e semiempíricas para, a nível de estudo prévio, determinar a zona de incidência do jato com a superfície livre a jusante.

Gun'ko et al (1965), tendo por base ensaios em laboratório e posterior validação com dados obtidos no protótipo, apresenta, em função número de Froude, Fr , uma curva (curva A da Figura 2.22) em que é

possível determinar a relação entre o alcance efetivo e o alcance teórico, L_e/L_t e, posteriormente, retirar o valor do alcance efetivo.

O número de Froude, na secção de saída, é definido pela expressão:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gh_0}} \tag{2.5}$$

em que g é a aceleração da gravidade, h_0 é a altura de água no lábio do trampolim na secção de saída e U_0 representa a velocidade do escoamento na secção de saída do trampolim, determinada como:

$$U_0 = \frac{Q}{bh_0} \tag{2.6}$$

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

Também Taraimovich (1978) (curva B da Figura 2.22), através de observações realizadas em protótipos, apresenta uma curva para a determinação do alcance efetivo, L_e .

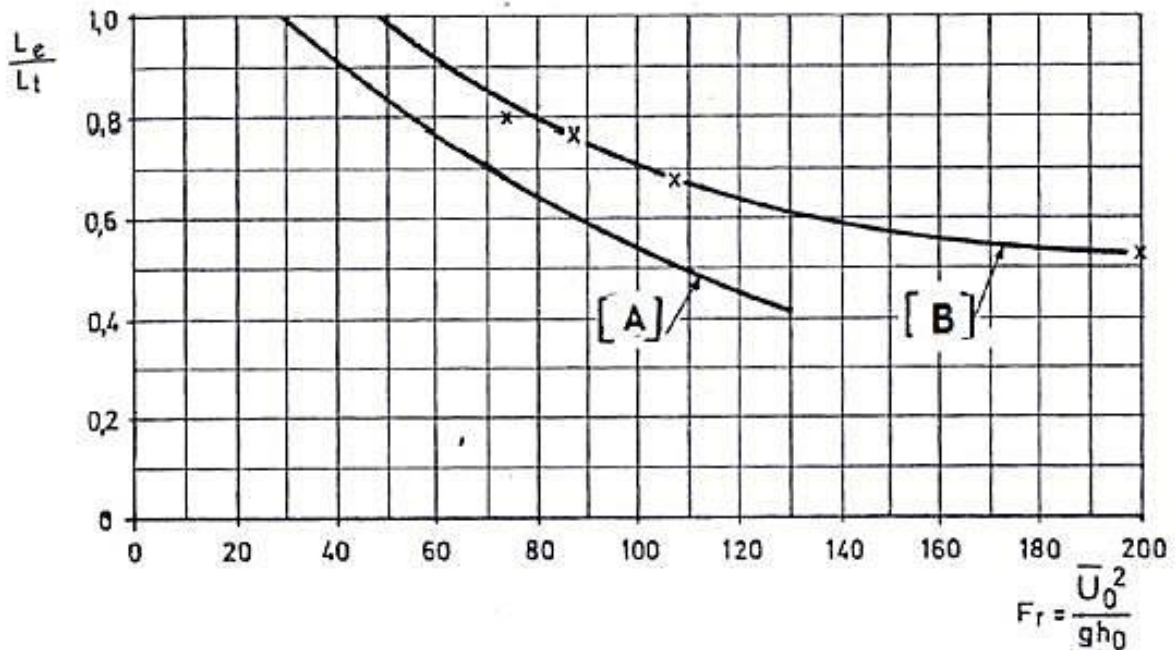


Figura 2.22- Determinação do alcance efetivo do jato - (A) Gun'ko et al; (B) Taraimovich (Lencastre, 2001).

Este método pode ser aplicado se $Fr^2 < 93$. Por observação do gráfico da Figura 2.22 verifica-se 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, válida para escoamentos bidimensionais, 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:

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

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 ² /s)	H_0 (m)	H_1 (m)	α (°)
11-29,4	35,7-92,5	4-28	12-35

Kawakami (1973), com base nos resultados obtidos em protótipo, apresenta um gráfico (Figura 2.23) em que faz depender o quociente L_e/L_t da velocidade na secção de saída do trampolim, U_0 . O alcance efetivo iguala ao alcance teórico quando U_0 é inferior a 13 m/s. Este estudo tem a particularidade, de considerar o efeito da resistência do ar, baseando-se numa forma não parabólica da trajetória.

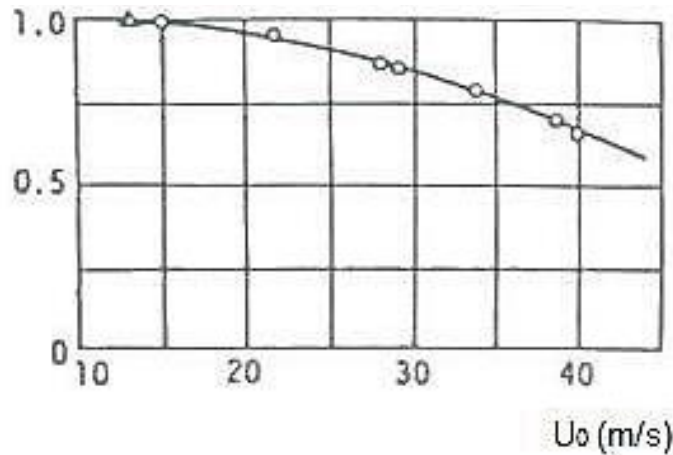


Figura 2.23- Determinação do alcance efetivo do jato – Kawakami (Martins, 1973).

Kamaneve (1966), tendo como fundamento ensaios experimentais, apresenta duas curvas (Figura 2.24) que permitem, através do alcance teórico, determinar o valor do alcance efetivo do jato. No entanto, estas curvas apenas são válidas 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, ϕ , também representados na Figura 2.24.

O coeficiente de perdas de carga pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\phi = \frac{U_0}{\sqrt{2gH_0}} \quad (2.8)$$

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.

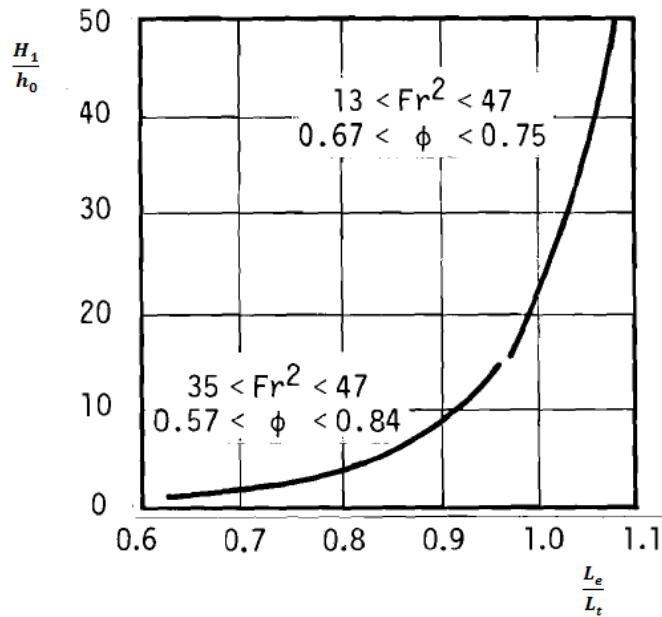


Figura 2.24- Determinação do alcance efetivo do jato (Adaptado de Whittaker e Schleiss (1984)).

2.3.4. PREVISÃO DA EROSÃO DO LEITO

Como referido anteriormente, a dissipação de energia devido ao impacto do jato no leito manifesta-se através da criação de uma escavação. O processo erosivo depende de fatores de natureza hidrológica e hidráulica, das características morfológicas e também das características geológicas do maciço rochoso.

A análise e previsão da erosão do leito é um processo que carece especial atenção devido aos problemas de estabilidade a que o aproveitamento hidráulico poderá ficar sujeito. Contudo, devido à complexidade das diferentes condições, é difícil prever com rigor a erosão do solo na zona de impacto. O recurso a estudos em modelos físicos torna-se, portanto, indispensável em projetos de dimensões apreciáveis pois é, provavelmente, o meio que oferece resultados mais credíveis (Figueiredo, 2010). É de notar que, durante a fase de exploração, a existência de um controlo contínuo das dimensões da erosão é imprescindível para que haja um bom funcionamento do aproveitamento.

É também possível estimar as dimensões da escavação devida à erosão de forma mais acessível, no entanto, não tão precisa. Diversos autores levaram a cabo estudos onde analisaram a evolução da erosão tendo em conta a influência dos diferentes fatores. A definição das fórmulas, empíricas ou semiempíricas, teve por base o estudo em modelos físicos, observações em protótipos ou ambos e, mais recentemente, em modelos computacionais. O recurso a este último é, geralmente, mais satisfatório que os restantes uma vez que os erros obtidos são menores e os coeficientes de correlação são mais elevados (Noori e Hooshyaripor, 2014).

Com o intuito de tornar a análise mais eficiente optou-se, tal como Mason e Arumugam (1985), por agrupar as diferentes expressões em 5 grupos, sendo essa divisão realizada consoante as variáveis independentes consideradas.

2.3.4.1. Grupo I

No primeiro grupo estão inseridos os autores que consideram a influência do caudal de descarga por unidade de largura, q , e da altura de queda, H , no cálculo da profundidade da escavação. Alguns autores ainda consideram a dimensão característica do material do leito, d .

De uma forma generalizada, a equação utilizada por alguns autores, tais como Schoklitsch (1935), Patrashev (1937), Veronese (1937), Eggenburger (1944), Hartung (1959), Franke (1960), Damle (1966), Chian Min Wu (1973), Chee e Kung (1974), Chee e Padivar (1969), Martins (1984), Taraimovich (1978), Machado (1980), Sofrelec (1980) e Incyth (1985), é a seguinte:

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

em que K é uma constante, proposta por cada autor, q representa o caudal por unidade de largura, H é a altura de queda e d é a dimensão característica do material do leito.

No caso de Bisaz e Tschopp (1972), a equação é apresentada de forma diferente, apesar de as variáveis consideradas serem as mesmas.

$$f = Kq^x H^y - Kd \quad (2.10)$$

A constante K é um parâmetro adimensional e tem em consideração fatores como a densidade das partículas, tomando valores diferentes consoante o autor, assim como as constantes x , y e z .

No quadro 2.3 são apresentados os valores dos mesmos bem como a informação relativa ao diâmetro característico, quando aplicável. As restantes variáveis têm o significado apresentado na Figura 2.17 e quadro 2.1.

Quadro 2.3- parâmetros para aplicação das equações (2.9) e (2.10).

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	-
Bisaz e Tschopp (1972)	2.76	0.50	0.25	1	d_{90}
Chian Min Wu (1973)	1.18	0.51	0.235	0	-
Chee & Kung (1974)	1.663	0.60	0.20	0.10	d_{50}
Chee & Padivar (1969)	2.216	0.67	0.18	0.063	d_{50}
Martins (B) (1984)	1.50	0.60	0.10	0	-
Taraimovich (1978)	0.633	0.67	0.25	0	-
Machado (1980)	1.35	0.50	0.3145	0.0645	d_{90}
SOFRELEC (1985)	2.30	0.60	0.10	0	-
INCYTH (1985)	1.413	0.50	0.25	0	-

2.3.4.2. 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.

De facto, o colchão de água surge como um elemento amortecedor das ações dinâmicas do jato, protegendo assim a zona de impacto do mesmo. Lencastre (1961) desenvolveu um estudo onde avalia a ação das pressões existentes na soleira na zona de impacto do jato. Anos mais tarde, este estudo foi também levado a cabo por Ramos (1978). Com o estudo realizado concluíram que os valores médios dos esforços que o jato transmite ao leito não são razão suficiente para a ocorrência da erosão do leito. Esta, por sua vez, é devida à flutuação dos referidos esforços, resultantes das flutuações turbulentas de pressão que são exercidas no leito. O levantamento dos blocos, e posterior transporte, tem origem na atuação das flutuações de pressão de baixo para cima, quando estas não são equilibradas com as de sentido oposto. Este estudo comprova também que a espessura do colchão de água tem influência na atenuação do efeito das flutuações turbulentas, aumentando o efeito da atenuação com o aumento da espessura do colchão de água. Lencastre (1961) afirma ainda que a existência de um colchão de água de espessura conveniente é mais eficiente no processo de dissipação de energia do que a existência de uma obra de dissipação de energia. O referido colchão de água pode resultar das próprias características

da vazão do leito ou, caso tal não seja possível, da construção de um açude a jusante. A abertura de uma escavação na zona de impacto pode também ser uma solução, no entanto acarreta uma análise adicional no que toca à operacionalidade e segurança do aproveitamento hidráulico. Nos casos em que a simples existência do colchão de água não é suficiente para a proteção do leito, deverá proceder-se à construção de uma bacia de dissipação (Carvalho, 2015).

Alguns dos autores listados a seguir consideram também a influência da aceleração da gravidade, g .

a) Jaeger (1939)

Jaeger (1939), foi um dos primeiros autores a ter em consideração a espessura do colchão de água. Tendo como base o estudo de Veronese o autor procedeu à sua reavaliação, deduzindo assim a seguinte expressão:

$$D = 0.6q^{0.5} H^{0.25} \left(\frac{h}{d}\right)^{0.333} \quad (2.11)$$

b) Martins (A) (1984)

$$D = 0,14N + 1,7h - \left(\frac{h}{N}\right)^2 \quad (2.12)$$

em que N é definido como:

$$N = \sqrt[7]{\frac{Q^3 H^{1/5}}{d^2}} \quad (2.13)$$

O autor propõe também duas equações para estimar as restantes dimensões da escavação originada, nomeadamente a largura e a extensão, dadas respetivamente por:

$$B_s = 1,6\sqrt[4]{D^3(D-h)} \quad (2.14)$$

$$L_s = (0,8 + 2 \cos \alpha)\sqrt[4]{D^3(D-h)} \quad (2.15)$$

Estas expressões só são válidas nas seguintes condições:

$$\frac{L_s}{D-h} = 2 - 6 \quad (2.16)$$

$$\frac{D}{D-h} = 1,5 - 5 \quad (2.17)$$

$$\frac{B_s}{D-h} = 2 - 5 \quad (2.18)$$

$$\alpha = 40^\circ - 70 \quad (2.19)$$

É de notar que a aplicação da equação (2.12) tem algumas limitações uma vez que o estudo foi realizado tendo conta a ação de jatos livres em leitos com materiais de grandes dimensões, situação bem diferente da consideração da ação do jato em salto de esqui num leito em areia.

c) Rubinstein (1963)

$$D = h + 0,19 \left(\frac{H+h}{d_{90}} \right)^{0,75} \frac{q^{1,2}}{H^{0,47} h^{0,33}} \quad (2.20)$$

d) Mason e Arumugam (1985)

$$D = K \frac{q^x H^y h^{0,15}}{g^{0,30} d_m^{0,10}} \quad (2.21)$$

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

$$K = 6,42 - 3,10H^{0,10} \quad (2.22)$$

$$x = 0,60 - \frac{H}{300} \quad (2.23)$$

$$y = 0,15 - \frac{H}{200} \quad (2.24)$$

$$d_m = 0,25m \quad (2.25)$$

e) Ghodsian (A) (1999)

Tendo como fundamento o estudo realizado sobre a influência de diferentes parâmetros na erosão a jusante de descarregadores em queda livre, o autor deduziu três equações que permitem definir a geometria da escavação, mais concretamente a profundidade máxima, D , a largura, B_s , e também a distância desde o ponto de saída do jato até ao ponto de profundidade máxima, L^* .

$$\frac{D}{h} = 0,75 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,524} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,366} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,255} \quad (2.26)$$

$$\frac{B_s}{h} = 2,83 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,225} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{-0,188} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,62} \quad (2.27)$$

$$\frac{L^*}{h} = 2,5 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,122} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,127} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,581} \quad (2.28)$$

f) Heng, Tingsanchali e Suetsugi (2013)

$$D = 7,4834 \frac{q^{1,4632}}{g^{0,7326} h^{1,1978}} \quad (2.29)$$

g) Bombardelli e Gioia (2006)

Os autores introduzem a densidade da água e do material do leito como variável.

$$D = K \frac{q^{0,67} H^{0,67} h^{0,15}}{g^{0,33} d^{0,33}} \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) \quad (2.30)$$

2.3.4.3. Grupo III

O terceiro grupo inclui equações com um maior grau de complexidade devido à consideração de um maior número de variáveis. Alguns dos autores referem que o ângulo de incidência é um fator

importante no desenvolvimento da erosão, outros fazem referência ao ângulo de saída ou até mesmo ao raio do trampolim em salto de esqui.

a) Mikhalev (1960)

$$D = \frac{1,804q \sin \alpha'}{1 - 0,215 \cot \alpha'} \left(\frac{1}{d_{90}^{0,33} h^{0,5}} - \frac{1,126}{H} \right) \quad (2.31)$$

b) Mirskhulava (1967b)

Este autor foi, provavelmente, o primeiro autor a considerar a influência do tipo de leito e da sua coesão na previsão da profundidade da escavação. Note-se que também é tida em conta a ação das flutuações de velocidade em jatos turbulentos.

A primeira equação desenvolvida pelo autor é a seguinte:

$$D = \frac{q \sin \alpha'}{1 - 0,175 \cot \alpha'} \left(\frac{0,97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1,35}{\sqrt{H}} \right) + 0,25h \quad (2.32)$$

Para leitos incoerentes o autor propõe outra equação, muito semelhante à anterior.

$$D = \frac{\sin \alpha'}{1 - 0,175 \cot \alpha'} \left(\frac{3\eta Ub_0}{W} - 7,5b_0 \right) + 0,25h \quad (2.33)$$

em que as variáveis η , b_0 , W e U são definidas, respetivamente, como:

$$\eta = 1,5 \rightarrow \text{modelo} \vee \eta = 2,0 \rightarrow \text{protótipo} \quad (2.34)$$

$$b_0 = \frac{0,89}{U} \quad (2.35)$$

$$W = \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma_0)d_{90}}{1,75\gamma_0}} \quad (2.36)$$

$$U = \sqrt{2gH} \quad (2.37)$$

O valor do peso específico da água tendo em conta a emulsão, γ_0 , é estimado em função do grau de emulsão e segundo outra referência deste autor (Mirskhulava, 1967a) pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$\gamma_0 = (1 - 0,18U_0^{2/5})\gamma \quad (2.38)$$

Esta expressão apenas é válida para valores de U entre 5 m/s e 25 m/s, assim como as expressões de D e W só têm validade nos casos em que $\alpha \geq 15^\circ$ e $d_{90} > 2$ mm. Caso contrário, deverá ser aplicado um coeficiente corretivo na referida equação, n_1 .

$$D = n_1 \frac{\sin \alpha'}{1 - 0,175 \cot \alpha'} \left(\frac{3\eta Ub_0}{W} - 7,5b_0 \right) + 0,25h \quad (2.39)$$

Para as diferentes gamas de diâmetro das partículas, foram obtidos experimentalmente diversos valores de n_1 . A expressão (2.40) traduz-se numa relação aproximada entre n_1 e d_{90} .

$$n_1 = 0,42\sqrt{d_{90}} \quad (2.40)$$

c) Yildiz e Uzucek (1994) e Yildiz e Uzucek (1996)

A equação proposta por estes dois autores (Yildiz e Uzucek, 1994) surgiu com o intuito de adaptar a equação desenvolvida por Veronese, que apenas era aplicada a jatos em queda livre, a jatos em salto de esqui. A equação foi desenvolvida tendo por base os dados obtidos no estudo realizado por Veronese e tendo em consideração o ângulo de incidência do jato.

$$D = 1,9 q^{0,54} H^{0,225} \sin \alpha' \quad (2.41)$$

Dois anos mais tarde realizaram um novo estudo (Yildiz e Uzucek, 1996), em que concluíram que a constante de proporcionalidade tomava o valor de 1,5 em vez de 1,9 e onde consideraram a influência do ângulo de saída do jato e não do ângulo de incidência.

$$D = 1,5 q^{0,54} H^{0,225} \sin \alpha \quad (2.42)$$

d) Azmathullah et al. (2004)

O estudo levado a cabo por Azmathullah et al. (2004) caracteriza-se pela análise rigorosa 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. O autor conclui que a profundidade máxima da escavação, D , a distância horizontal desde o ponto de saída do jato até ao ponto de maior profundidade, L^* , e a largura, B_s , são influenciadas por essas relações.

$$\frac{D}{h} = 6,914 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,694} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,196} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,0815} \left(\frac{R}{h} \right)^{-0,233} \alpha^{0,196} \quad (2.43)$$

$$\frac{L^*}{h} = 9,85 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,42} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,037} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,28} \left(\frac{R}{h} \right)^{0,043} \alpha^{0,3461} \quad (2.44)$$

$$\frac{B_s}{h} = 5,42 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{-0,015} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,242} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,55107} \left(\frac{R}{h} \right)^{0,1396} \alpha^{-0,16} \quad (2.45)$$

e) Naini (2011)

As equações desenvolvidas por Naini (2011) são semelhantes às anteriormente apresentadas por Azmathullah et al. (2004), modificando apenas a constante e os diferentes expoentes. O autor estabeleceu também uma equação para estimar a extensão da escavação, L_s .

$$\frac{D}{h} = 3,278 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,702} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,011} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,135} \left(\frac{R}{h} \right)^{0,02} \alpha \quad (2.46)$$

$$\frac{L^*}{h} = 2,599 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,273} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,01} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,523} \left(\frac{R}{h} \right)^{0,034} \alpha^{-0,962} \quad (2.47)$$

$$\frac{L_s}{h} = 11,761 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,656} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,02} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,2} \left(\frac{R}{h} \right)^{0,011} \alpha^{0,01} \quad (2.48)$$

$$\frac{B_s}{h} = 169,385 \left(\frac{q}{\sqrt{gh^3}} \right)^{0,01} \left(\frac{d_{50}}{h} \right)^{0,891} \left(\frac{H}{h} \right)^{0,01} \left(\frac{R}{h} \right)^{0,096} \alpha^{1,675} \quad (2.49)$$

f) Ghodsian (B) (2012)

Ghodsian (2012) realizou um novo estudo, onde analisou a erosão num leito com material sedimentar não uniforme. A equação desenvolvida faz depender as características da escavação do número de Froude densimétrico, Fr_{d90} , que, por sua vez, considera o efeito da graduação do material do leito. O autor conclui também que as dimensões da fossa de erosão são influenciadas pelas características da bacia onde se dá a restituição e pelo raio do trampolim em salto de esqui.

O número de Froude densimétrico é dado pela seguinte expressão:

$$Fr_{d90} = \frac{U}{\sqrt{gd_{90} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}} \quad (2.50)$$

As seguintes expressões permitem estimar a profundidade máxima da escavação, a sua largura, extensão e também a altura da barra formada a jusante da escavação, respetivamente.

$$\frac{D}{h} = 0,54 (Fr_{d90})^{0,42} \left(\frac{H}{R} \right)^{-0,96} \left(\frac{B}{b} \right)^{0,68} \left(\frac{h}{H} \right)^{-1,27} \quad (2.51)$$

$$\frac{B_s}{h} = 8,44 (Fr_{d90})^{0,25} \left(\frac{H}{R} \right)^{-0,77} \left(\frac{B}{b} \right)^{0,10} \left(\frac{h}{H} \right)^{-1,01} \quad (2.52)$$

$$\frac{L_s}{h} = 2,22 (Fr_{d90})^{0,27} \left(\frac{H}{R} \right)^{-0,54} \left(\frac{B}{b} \right)^{0,38} \left(\frac{h}{H} \right)^{-1,13} \quad (2.53)$$

$$\frac{h_m}{h} = 0,69 (Fr_{d90})^{0,2} \left(\frac{H}{R} \right)^{-0,7} \left(\frac{B}{b} \right)^{0,45} \left(\frac{h}{H} \right)^{-0,76} \quad (2.54)$$

2.3.4.4. Grupo IV

No grupo IV inserem-se as equações que fazem depender a profundidade da erosão da velocidade do jato.

a) Mason (B) (1989)

Mason (1989) afirma que a introdução e quantificação do efeito do ar como parâmetro adicional se pode tornar muito útil 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.

$$\beta = 0,13 \left(1 - \frac{U_e}{U} \right) \left(\frac{H}{t} \right)^{0,446} \quad (2.55)$$

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

$$U_e = 1,1 \text{ m/s} \quad (2.56)$$

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

$$D = 3,39 \frac{q^{0,60} (1 + \beta)^{0,30} h^{0,16}}{g^{0,30} d_m^{0,06}} \quad (2.57)$$

$$d_m = 0,25 \text{ m} \quad (2.58)$$

b) Hoffmans (1998)

$$D = c_{2v} \sqrt{\frac{qU \sin \alpha'}{g}} \quad (2.59)$$

$$d_{90} < 0,0125 \text{ m} \rightarrow c_{2v} = \frac{20}{(D_{90}^*)^{1/3}} \quad (2.60)$$

$$d_{90} \geq 0,0125 \text{ m} \rightarrow c_{2v} = 2,9 \quad (2.61)$$

c) Zhang, Pang e Wang (2014)

Mais recentemente, estes autores desenvolveram uma equação com base num modelo numérico – “CFD-Mecânica de Fluidos Computacional”. Existe uma diferença entre o recurso aos tradicionais estudos experimentais em modelos físicos e o método levado a cabo no estudo destes autores, isto porque a técnica CFD considera as condições hidráulicas e morfológicas mais complexas. Note-se no entanto que, 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:

$$D = 0,179 U^{1,29} P^{1,8} \quad (2.62)$$

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

2.3.4.5. Grupo V

Por último, no grupo V, é evidenciada a importância do fator tempo. Diferentes autores defendem que a erosão é proporcional ao tempo de atuação do jato no leito do rio.

Doddiah et al. (1953) apresentam uma equação a “longo termo” para que se possa estimar a profundidade máxima da escavação.

$$D = h + \frac{2h}{3} \left(\frac{q}{HW_m} \right)^{2/3} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \left(\frac{q}{HW_m} \right)^{1/6} \quad (2.63)$$

A definição dos limites de validade de cada equação é fulcral 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.

No entanto não foi possível definir esses limites para todas as equações pois nem todos os autores os enumeraram.

No quadro 2.4 estão listados os limites de validade de algumas expressões, que dizem respeito à aplicação no modelo ou no protótipo, dependendo do autor.

Quadro 2.4- Limites de aplicação das equações.

Autor	Expressão	Aplicação	d (mm)	h (m)	H (m)	q (m ² /s)	α (rad)	Raio (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	-	-
Taraimovich (1978)	(2.9)	Modelo e Protótipo	-	4,7-40	14,3-225	33,5-137	0,7-1,1	-
Mason & Arumugam (1985)	(2.21)	Modelo e protótipo	1-41	0,03-42	0,33-109	0,009-220	0,4-1,5	-
Ghodsian (A) (1999)	(2.26) a (2.28)	Modelo	2,9- 15,6	0,05-0,25	0,263- 0,506	0,01-0,04	-	-
Heng et al. (2013)	(2.29)	Modelo	-	0,179- 0,536	-	-	-	-
Mikhalev (1960)	(2.31)	Modelo e Protótipo	2-40	-	-	-	-	-
Azmathullah et al. (2004)	(2.43) a (2.45)	Modelo	2-8	0,0286- 0,265	0,279- 1,796	0,0089- 0,204	0,174- 0,78	0,1- 0,6096
Naini (2011)	(2.46) a (2.48)	Modelo	0,2-6	0,06-0,265	1,129- 1,404	0,0196- 0,0758	0,451	0,1
Mason (B) (1989)	(2.57)	Modelo	5-10	-	0,33-2	0,02-0,07	-	-
Doddial et al. (1953)	(2.63)	Modelo	4,8-12	0,04-0,31	0,14-1,19	0,011-0,05	-	-

Ghodsian (B) (2012) apresenta 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 (B) (2012) – expressões (2.51) a (2.54).

	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

2.4. MODELAÇÃO FÍSICA

O recurso a modelos físicos é imprescindível em projetos com um grau de importância elevado, como é o caso do projeto de um aproveitamento hidráulico. A modelação física mostra ser bastante vantajosa pois permite representar, com algum rigor, a sua geometria e simular os fenómenos mais complexos que têm origem no protótipo. Note-se, no entanto, que nem sempre é conseguida uma simulação completa no modelo dos fenómenos que ocorrem no protótipo, dando origem à existência de efeitos de escala, efeitos de modelo e efeitos de medição (Pinto, 2015).

Os efeitos de escala são resultado da incorreta simulação dos fenómenos físicos no modelo, que é originada pela incompatibilidade dos diferentes critérios de semelhança (Froude, Reynolds, Weber, Cauchy-Mach, Euler e Strouhal). Torna-se então necessário selecionar as forças dominantes no estudo a realizar e desprezar as restantes.

Em estudos realizados em modelos de descarregadores, as forças de pressão e de gravidade assumem uma elevada importância, razão pela qual grande parte dos estudos realizados em laboratório seguem o critério de semelhança de Froude (Forças inércia/Forças gravíticas).

Por outro lado, a existência de emulsão de ar no escoamento faz com que as forças de viscosidade e de tensão superficial assumam também elas um papel importante na passagem do protótipo para o modelo. No entanto, a impossibilidade de reproduzir simultaneamente os critérios de semelhança de Reynolds (Forças inércia/Forças viscosidade), Weber (Forças inércia/Forças de tensão superficial) e Froude resulta numa incorreta reprodução, no modelo, das bolhas de ar geradas no protótipo. No entanto, vários autores estudaram esta problemática e concluíram que o critério de semelhança de Froude é suficiente para representar o arejamento do escoamento e a dissipação de energia, desde que sejam respeitados os limites inferiores impostos para o número de Reynolds (4×10^4) e Weber (100) (Antunes, 2012).

Outro aspeto fulcral a ter em consideração nos modelos reduzidos são as características do fundo móvel a utilizar. De acordo com as leis de semelhança, os materiais a utilizar no modelo são tanto mais leves quanto maior é a escala geométrica do mesmo. A semelhança está relacionada não só com o peso específico, mas também com a granulometria do material. É de salientar que, se os sedimentos existentes no protótipo forem demasiado finos, não é possível representá-los corretamente no modelo, pois a fragmentação dos sedimentos e o seu modo de transporte serão alterados (Silva et al., 2009). A solução poderá passar pela utilização de um material com a mesma dimensão mas de densidade inferior ou mesmo pelo recurso a um modelo distorcido, visto ser uma forma de aumentar a tensão tangencial sobre o fundo, aumentando assim a mobilidade dos sedimentos (Pinto, 2015).

Os denominados efeitos de modelo resultam da incorreta reprodução de certas características do protótipo, como por exemplo, a geometria ou as características do escoamento devido à interação com as condições fronteira do modelo. Estes defeitos existentes no modelo refletem-se em erros nos resultados obtidos, como é o caso das dimensões da escavação originada pela ação do jato, que poderão ser limitadas devido às paredes do modelo.

Por último, existem também efeitos de medição, que estão relacionados não só com os erros de leitura mas também com a existência de algumas limitações nos equipamentos utilizados. As incertezas obtidas nas medições podem ser minoradas recorrendo a diferentes métodos para medir a mesma variável, realizando várias calibrações do sistema de medição e também repetindo os ensaios experimentais (Pinto, 2015).

3

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para estudar a erosão a jusante de um descarregador em degraus equipado com um trampolim em salto de esqui, recorreu-se ao modelo reduzido já existente nas instalações do Laboratório de Hidráulica da secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (HRHA) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O circuito hidráulico (Figura 3.1) é composto por dois reservatórios de alimentação, R_1 e R_2 (Figura 3.2), um sistema de tubagens, um reservatório de tranquilização, R_3 , um descarregador de cheias em degraus, uma bacia de restituição e um reservatório de bombagem, R_4 (Figura 3.3).

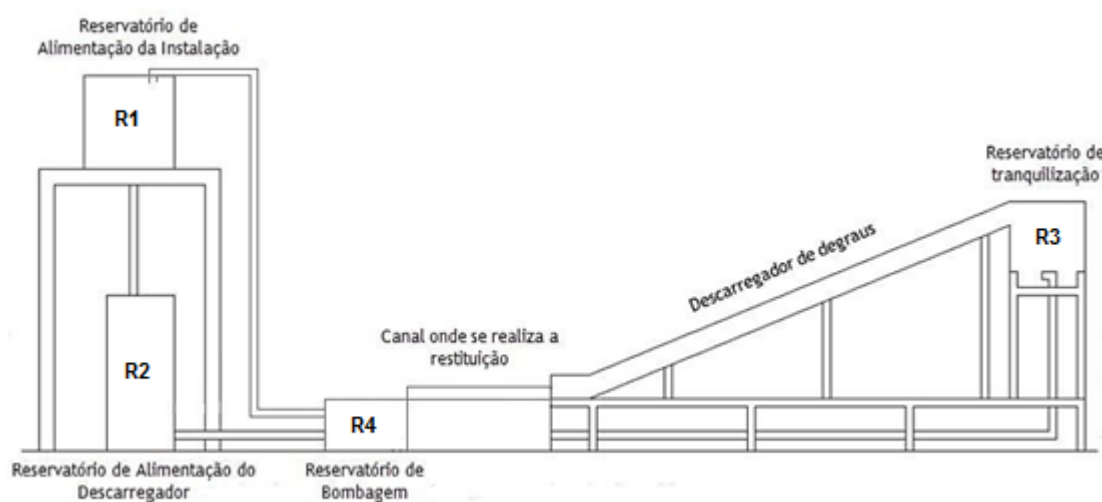


Figura 3.1- Esquema da instalação experimental utilizada (Adaptado de Figueiredo (2010)).

O reservatório de alimentação superior (R_1) é responsável pela alimentação do reservatório inferior (R_2) e por manter em equilíbrio o nível de água no mesmo. Por sua vez, R_2 alimenta o descarregador com recurso a uma bomba, sendo feita a adução de água para o reservatório de tranquilização (R_3) por meio do sistema de tubagens. R_3 tem como função estabilizar o escoamento antes que este comece a

ser escoado pelo descarregador, sendo o caudal restituído na bacia existente a jusante do mesmo e posteriormente conduzido para o reservatório de bombagem (R_4), onde se realiza a elevação do caudal para R_1 , através de uma bomba submersível.



Figura 3.2 – Reservatórios de alimentação superior (R_1) e inferior (R_2).



Figura 3.3 – Instalação experimental.

O modelo reduzido do descarregador de cheias foi construído em betão à escala geométrica 1:40, e mede, na sua totalidade, 1 m de altura e 2,6 m de comprimento.

Os vinte e seis degraus que constituem o descarregador apresentam uma altura de 3,75 cm e um comprimento de 10 cm, já a largura varia entre 5 cm e 15 cm, dependendo da secção onde estão inseridos. A secção de convergência localiza-se a montante da zona central, possuindo uma largura inicial de 15 cm, a qual é reduzida, na zona central, para 5 cm, mantendo-se constante até à secção final do descarregador.

No presente estudo foram utilizados modelos de trampolim em salto esqui com ângulos de saída de 20°, 25°, 30° e 45°. Os esquemas do trampolim em salto de esqui dos modelos com 20°, 30° e 45°, construídos por Figueiredo (2010), são apresentados no anexo A. O modelo com 25° foi concebido e construído no âmbito do presente estudo, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.4.

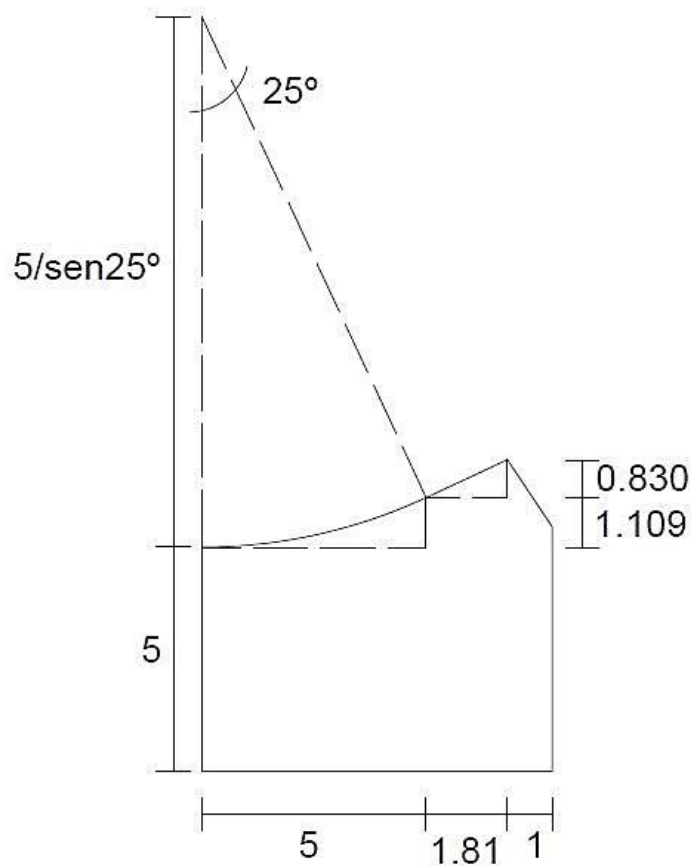


Figura 3.4- Esquema do trampolim em salto esqui com $\alpha = 25^\circ$ (medidas em centímetros).

A bacia de restituição (Figura 3.5), realizada com placas de perspex, tem 0,705 m de largura, 1,5 m de comprimento e 0,70 m de altura e está munida, na secção de jusante, de um descarregador de parede delgada que permite controlar o caudal e regular o nível do colchão de água na zona de restituição, simulando assim a situação de contra-embalse existente no protótipo. No interior da bacia foi colocada uma placa de perspex que serve de base ao fundo móvel. Este é constituído por material granular não coerente.

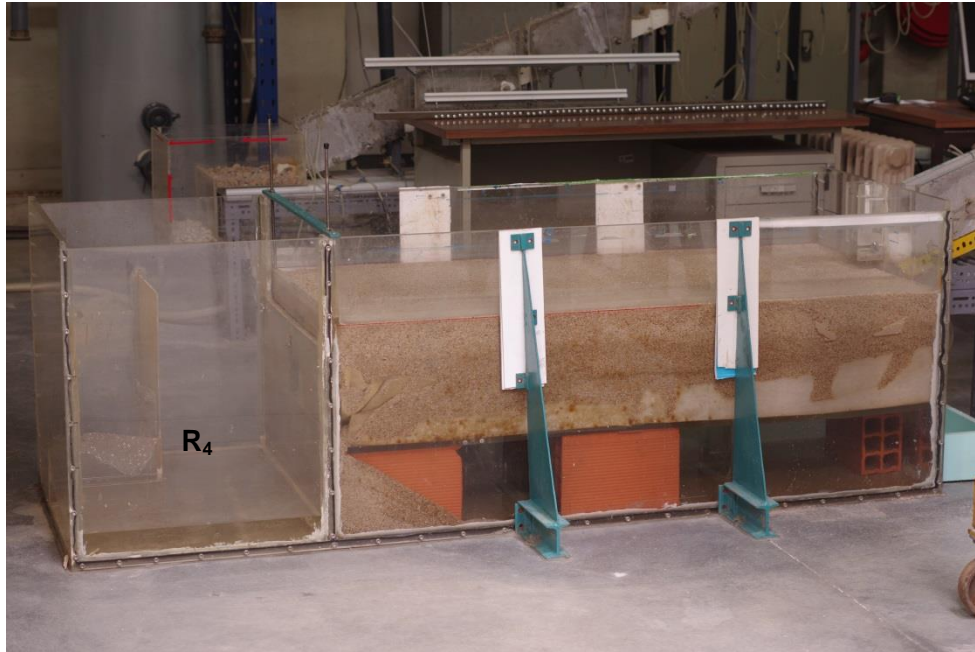


Figura 3.5 – Bacia de restituição e reservatório de bombagem, R4.

3.2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO PARA O FUNDO MÓVEL

O material utilizado para a representação do fundo móvel, com uma espessura de 0,20 m, é do tipo granular, e a sua densidade específica toma o valor de $2,65 \text{ kg/m}^3$. Na Figura 3.6 está representada a curva granulométrica da areia considerada, e no quadro 3.1 apresentam-se os valores das suas dimensões características. No anexo B encontra-se o quadro com os valores relativos à curva granulométrica obtida.

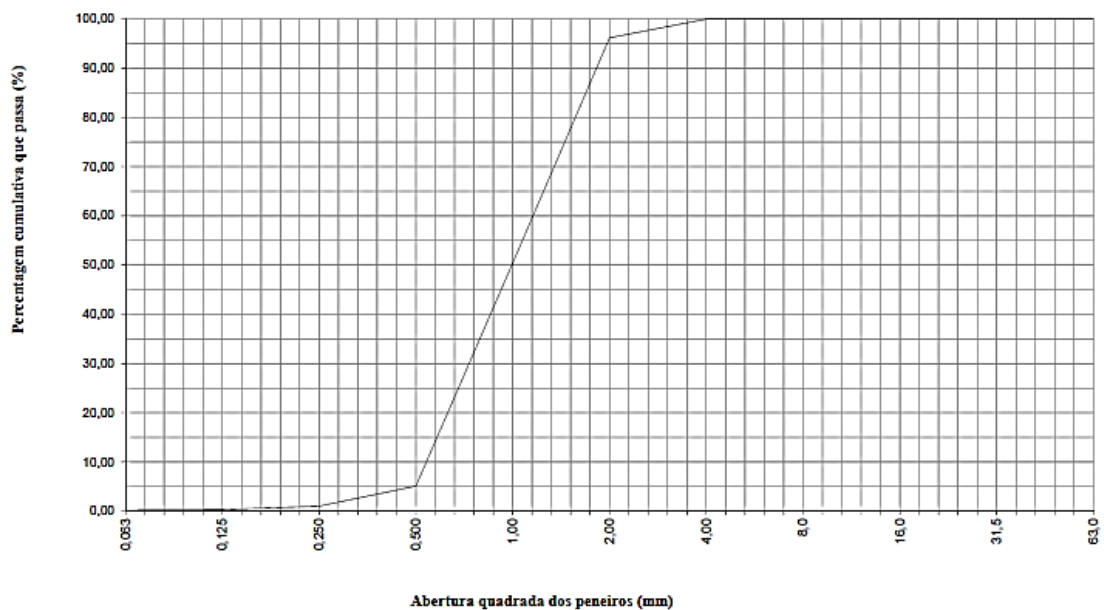


Figura 3.6- Curva granulométrica do material granular utilizado nos ensaios experimentais.

Quadro 3.1- Dimensões características do material granular utilizado.

Dimensões características [mm]	
d_{10}	0,550
d_{50}	0,992
d_{60}	1,200
d_{85}	1,750
d_{90}	1,855

O coeficiente de uniformidade da areia, CU , dado pela expressão (3.1) é de aproximadamente 2,18. Segundo Fernandes (2012), para valores de $CU < 5$ a areia é uniforme. O conhecimento deste parâmetro é importante para a análise do transporte de sedimentos e configuração da escavação de erosão.

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

No quadro 3.2 apresentam-se as dimensões características do material granular utilizado no estudo de Figueiredo (2010).

Dimensões características [mm]	
d_{50}	1,207
d_{85}	2,440
d_{90}	2,970

Como se pode verificar existe uma diferença entre as características das areias utilizadas nos dois estudos, o que irá influenciar o desenvolvimento da escavação de erosão e os resultados obtidos pela aplicação das diversas expressões.

3.3. PROCEDIMENTO ADOTADO NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

O procedimento adotado foi o mesmo em todos os ensaios, pois só assim se consegue garantir a repetibilidade dos mesmos. Com efeito, a sequência das ações realizadas foi a seguinte:

- Ajuste da comporta, consoante a espessura do colchão de água desejada
- Nivelamento do leito
- Definição do caudal
- Levantamento do perfil longitudinal recorrendo à técnica descrita em 3.5.3 e tendo em consideração os parâmetros apresentados na Figura 3.17

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. De modo a evitar esta situação, o nivelamento do leito foi realizado com o auxílio de um nível.

Note-se ainda que, no final de cada ensaio, e para assegurar um transporte de sedimentos similar, se procedeu à movimentação do material do leito.

3.4. MODELO DE SEMELHANÇA UTILIZADO

O fenómeno do escoamento caracteriza-se pela atuação de seis forças: as forças de inércia, gravíticas, viscosidade, tensão superficial, pressão e compressão elástica. Como referido em 2.4, a incompatibilidade associada à simulação de todas as forças obriga a que haja uma seleção daquelas que assumem um papel mais dominante.

Para a caracterização dos fenómenos ocorrentes no presente estudo, as forças de inércia (que estão sempre presentes em fenómenos hidráulicos e funcionam como referência para as restantes forças) e as forças gravíticas revelam ser as mais importantes (Chanson et al., 2003).

Deste modo, optou-se por utilizar o modelo de semelhança de Froude, que é conseguido igualando o número de Froude, Fr , no modelo e no protótipo.

$$\lambda_{Fr} = \frac{Fr_{modelo}}{Fr_{protótipo}} \quad (3.2)$$

O número de Froude é dado pelo quociente entre as forças de inércia e as forças de gravidade.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh_0}} \quad (3.3)$$

Admitindo que o fluido utilizado no modelo possui as mesmas características que o fluido utilizado no protótipo, é possível estabelecer as relações de escala para as diferentes grandezas e forças intervenientes. No quadro 3.2 são apresentadas essas relações.

Quadro 3.2- Razões de escala, λ , segundo a semelhança de Froude.

Razões de escala segundo a semelhança de Froude					
Semelhança Geométrica		Semelhança Cinemática		Semelhança Dinâmica	
Comprimento	λ_L	Tempo	$\lambda_L^{1/2}$	Força	λ_L^3
Área	λ_L^2	Velocidade	$\lambda_L^{1/2}$	Massa	λ_L^3
Volume	λ_L^3	Aceleração	λ_L	Pressão	λ_L
		Caudal	$\lambda_L^{5/2}$	Trabalho	λ_L^4
		Caudal por unidade de largura	$\lambda_L^{3/2}$	Potência	$\lambda_L^{7/2}$

3.5. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

3.5.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS

Os caudais foram medidos com recurso a um caudalímetro eletromagnético (Figura 3.7), da marca Fisher&Porter, modelo MAG-XE, instalado na tubagem existente entre o reservatório de alimentação e o reservatório de tranquilização.



Figura 3.7 – Caudalímetro electromagnético.

Este aparelho permite a leitura direta dos valores instantâneos dos caudais escoados no seu visor, possibilitando um maior controle ao longo da realização do ensaio.

No entanto, com o intuito de tornar o processo de medição de caudais mais eficaz e obter valores com um maior rigor, procedeu-se à ligação do caudalímetro a um sistema de aquisição de dados, constituído por uma placa National Instruments NI USB-6009, que capta o sinal emitido pelo equipamento de medição de caudais.

A placa de aquisição de dados está conectada a um computador Intel® Pentium® CPU 3.00GHz existente no laboratório. O registo dos dados medidos é realizado através do software LabView 8.6, que permite estipular não só a frequência de aquisição de dados e o tamanho das amostras como também possibilita a exportação dos dados para um ficheiro Excel.

A recolha de várias amostras ao longo do ensaio permite estabelecer o valor médio da variável, \bar{x} , bem como o valor das suas flutuações, dado pelo valor do desvio padrão, σ .

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.5)$$

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

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

A técnica de aquisição de imagens, designada por TAI, consiste na captura de imagens por meio de uma máquina fotográfica digital e posterior processamento, que pode ser facilmente realizado recorrendo a ferramentas simples e adequadas disponíveis no computador, como é o caso do Matlab ou do GIMP (programa freeware para processamento de imagens). Posteriormente será explicado com mais detalhe a aplicação de ambas as ferramentas no caso em estudo.

Este método foi desenvolvido por Aleixo e Proença (2007) num estudo cujo objetivo era a medição da trajetória de um jato livre e que, segundo os autores, mostrou ser bastante eficaz dado à boa qualidade dos resultados obtidos. As vantagens da TAI estão associadas ao facto de ser uma técnica de fácil aplicação e de não exigir grande mobilização de recursos e tempo.

No caso em estudo foi utilizada uma máquina fotográfica digital Canon EOS 500D com 16 Mpixéis de resolução e uma lente 18-55 mm.

É importante realçar que a iluminação no local é um fator fulcral na técnica de aquisição de imagens, pois uma boa iluminação resultará em imagens mais esclarecedoras, o que irá facilitar a fase de processamento, minimizando a necessidade de pré-processamento (e.g. aumento do contraste). Outro dos requisitos a ter em consideração é a fixação da máquina fotográfica na mesma posição, por meio de um tripé, com o objetivo de manter o alinhamento do sistema de aquisição de imagens durante as medições.

No decorrer dos ensaios foi possível observar que o jato apresentava uma configuração bastante oscilante ao longo do tempo, conforme se pode confirmar pela observação das fotografias da Figura 3.8. Por este motivo, a utilização de apenas uma imagem revelou-se insuficiente para a correta determinação da altura de água na secção de saída do trampolim em salto de esqui e da trajetória do jato. Assim sendo, desenvolveu-se um código em Matlab com o intuito de somar as diversas imagens do jato obtidas ao longo de cada ensaio, sendo o resultado uma imagem média que traduz o jato médio. Na Figura 3.9 apresenta-se, como exemplo, a imagem que traduz o jato médio obtido a partir das nove imagens da Figura 3.8.



Figura 3.8- Sequência de fotografias do jato obtidas para um dos ensaios experimentais.

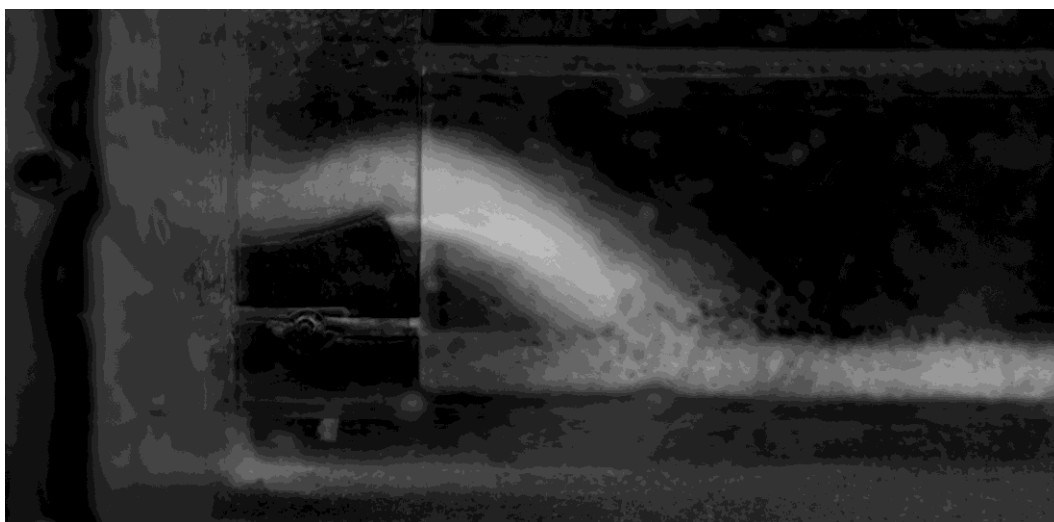


Figura 3.9- Imagem do jato médio obtida através do código escrito em Matlab, a partir das imagens da Figura 3.8.

3.5.2.1.Registo de trajetórias reais de jatos

A caracterização da trajetória do jato obtido experimentalmente foi realizada através da TAI e das duas ferramentas já mencionadas anteriormente: o GIMP e o Matlab. O GIMP foi utilizado para a medição do alcance do jato, enquanto o código desenvolvido em Matlab permitiu a definição das coordenadas da trajetória do jato.

Como já foi referido, o GIMP é uma ferramenta de simples aplicação e cujas funcionalidades são suficientes para o estudo em questão.

A cada imagem é associado um eixo de coordenadas com unidades em pixéis. Torna-se então necessário estabelecer uma relação entre as coordenadas em pixéis e as coordenadas físicas. Essa correspondência é realizada por meio de uma imagem de calibração, que deverá conter uma escala de comprimentos físicos, ou um objeto cujas dimensões físicas sejam conhecidas. Note-se que, para não haver distorção da escala, ambos os elementos deverão estar posicionados no mesmo plano e em foco.

Assumindo que: a) x_0 e y_0 representam as dimensões físicas conhecidas, horizontal e vertical, e que i_0 e j_0 correspondem às dimensões em pixéis, horizontal e vertical; b) a distorção da lente é nula, é possível definir os fatores lineares de calibração, horizontal, β_x , e vertical, β_y .

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

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

O registo das coordenadas da trajetória do jato com recurso ao Matlab, tal como na situação anterior, tem como referência as coordenadas em pixéis.

Tendo como base uma imagem do jato médio, à qual está associada um eixo de coordenadas, é necessário seleccionar, inicialmente, o ponto de origem do jato e, de seguida, seleccionar n pontos que definam as envolventes inferior e superior do jato.

Através do código escrito em Matlab, efetua-se uma interpolação das coordenadas das trajetórias, correspondentes às duas envolventes, obtendo assim a trajetória média do jato (Figura 3.10). O programa extrai os valores das coordenadas num ficheiro de dados que pode posteriormente ser analisado numa ferramenta de cálculo como o Excel.

A medição das coordenadas da trajetória e do alcance do jato tem como principal objetivo a realização de uma análise comparativa com os valores teóricos, calculados através das expressões (2.1) e (2.2), respetivamente. Por outro lado, é ainda possível comparar as duas metodologias utilizadas para a medição do alcance.

Recorrendo aos dois métodos anteriormente apresentados, efetuou-se a medição do alcance do jato. Na Figura 3.11 pode-se visualizar o critério utilizado no primeiro método, que consiste na medição direta na imagem da distância, segundo a direção horizontal, entre a secção de saída do trampolim e a secção média do jato na zona de incidência do jato com o colchão de água existente.

O segundo método parte das coordenadas da trajetória média sendo possível obter o valor do alcance do jato igualando o valor da ordenada ao valor da espessura do colchão de água.

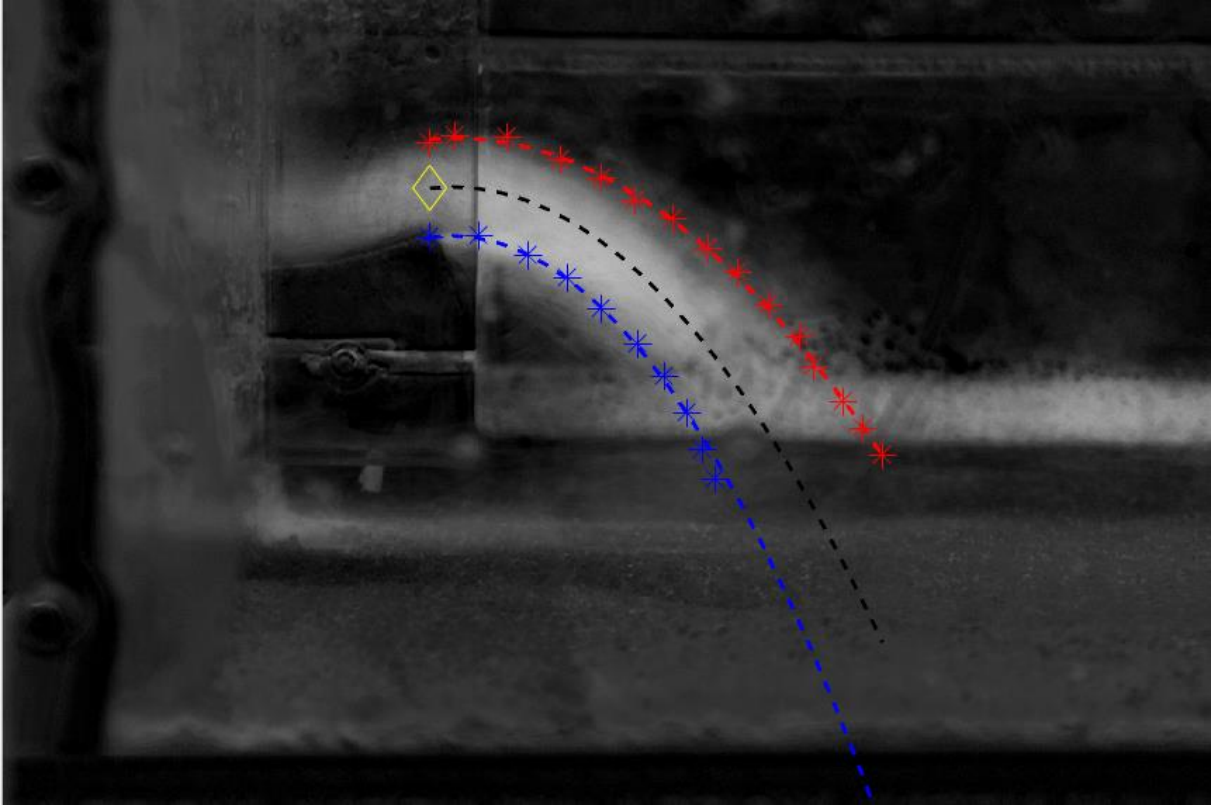


Figura 3.10- Trajetórias superior, média e inferior ($\alpha=20^\circ$, $Q=0,71L/s$ e $h=3cm$).

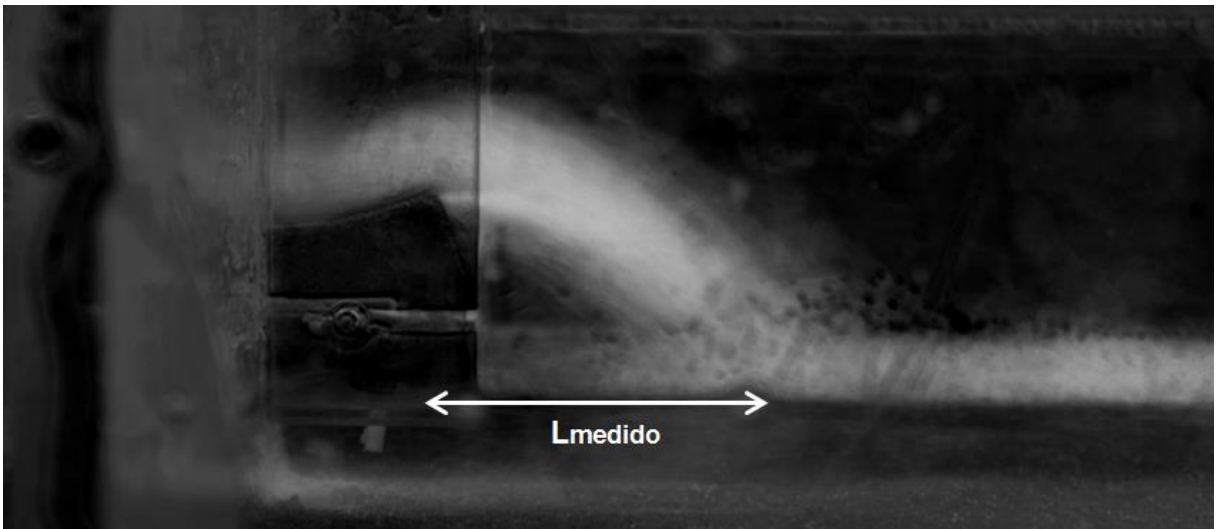


Figura 3.11- Critério utilizado para a medição do alcance do jato – distância, na horizontal, entre a secção de saída do trampolim e a secção média do jato na zona de incidência.

Na Figura 3.12 encontra-se uma representação gráfica, realizada para os ensaios com $\alpha = 20^\circ$, da comparação dos alcances teóricos e medidos através dos dois métodos descritos.

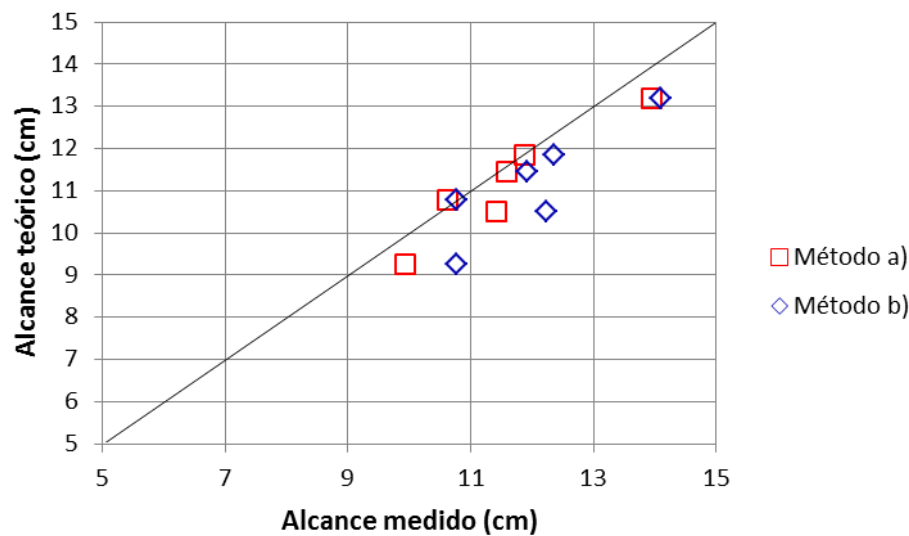


Figura 3.12- Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos e medidos - Método a) medição do alcance através do GIMP; Método b) medição do alcance através das coordenadas da trajetória.

Como se pode observar, os resultados obtidos pelos dois métodos são semelhantes e aproximam-se dos valores esperados. No entanto, verifica-se que existe uma menor dispersão de resultados no método a), correspondente à medição realizada através do GIMP. Assim sendo, para a concretização da análise apresentada no capítulo 4, considerou-se apenas os resultados obtidos pelo primeiro método exposto.

3.5.2.2. 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 Figueiredo (2010) o método utilizado para a medição de h_0 consistia num sistema de flutuador, constituído por um flutuador ligado a um potenciómetro, cuja variação na forma de sinal elétrico, transmitida para o sistema de aquisição de dados, era função da posição do flutuador o qual, por sua vez, dependia da altura do escoamento. No entanto, o autor concluiu que para baixos caudais o flutuador ficava submerso, devido ao afogamento do ressalto, não traduzindo os valores reais da altura de água.

Optou-se no presente estudo por não utilizar este método mas sim utilizar a TAI que, segundo Figueiredo (2010), mostrou ser um método bastante eficaz na determinação do alcance real do jato.

A observação dos diferentes ensaios experimentais permitiu verificar que, para além da oscilação do jato, a ocorrência de um elevado emulsão de ar na secção de saída do trampolim dificultava a definição da altura do escoamento nessa secção.

Dado à dificuldade em definir o limite superior da lâmina de água, procurou-se, através de um código escrito em Matlab, explorar três metodologias distintas que permitissem estabelecer esse limite.

- a) Medição de h_0 através da média das envolventes da trajetória do jato
- b) Medição de h_0 através da seleção de um ponto no perfil de intensidade luminosa
- c) Medição de h_0 através do cálculo do integral do perfil de intensidade luminosa

A primeira metodologia consiste na determinação de h_0 através da trajetória média do jato obtida com recurso ao código desenvolvido em Matlab, já descrito em 3.5.2.1. O valor de h_0 corresponde ao valor da ordenada, na secção de saída do trampolim.

Os outros dois métodos baseiam-se no perfil de intensidade luminosa na secção de saída do trampolim (Figura 3.13), que está relacionado com a presença do jato, ou seja, quanto maior a intensidade, maior a sobreposição de água nesse ponto.

Deste modo, o critério de medição utilizado na metodologia b) consiste na seleção do ponto a partir do qual a intensidade luminosa começa a decrescer mais acentuadamente. 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 quantitativo. Esta técnica deverá ser explorada num trabalho futuro.

Nas Figuras 3.13 e 3.14 apresenta-se um exemplo da aplicação deste método para uma condição de escoamento estudada.

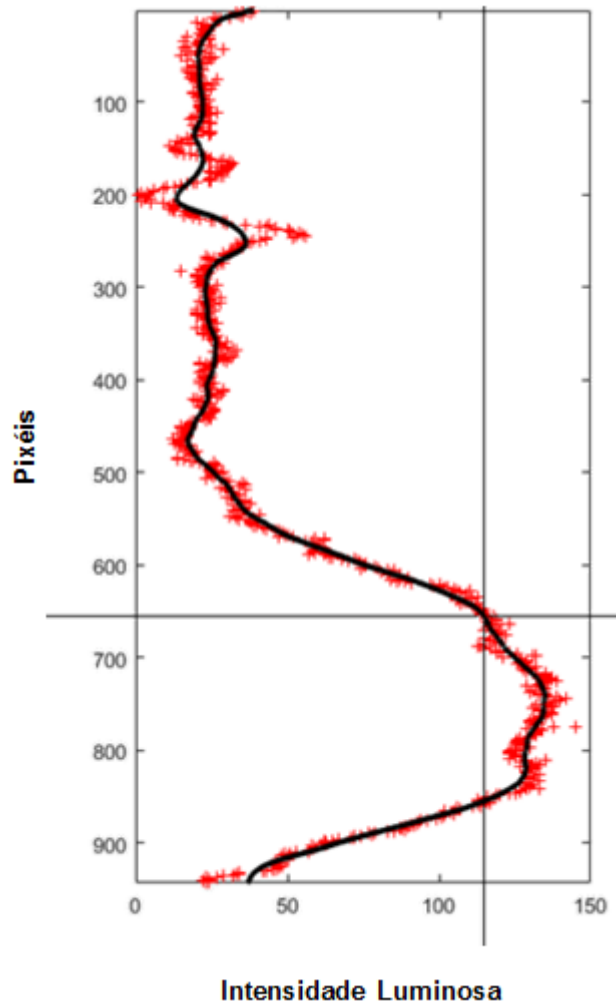


Figura 3.13- Exemplo de seleção do ponto no perfil de intensidade- metodologia b) ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

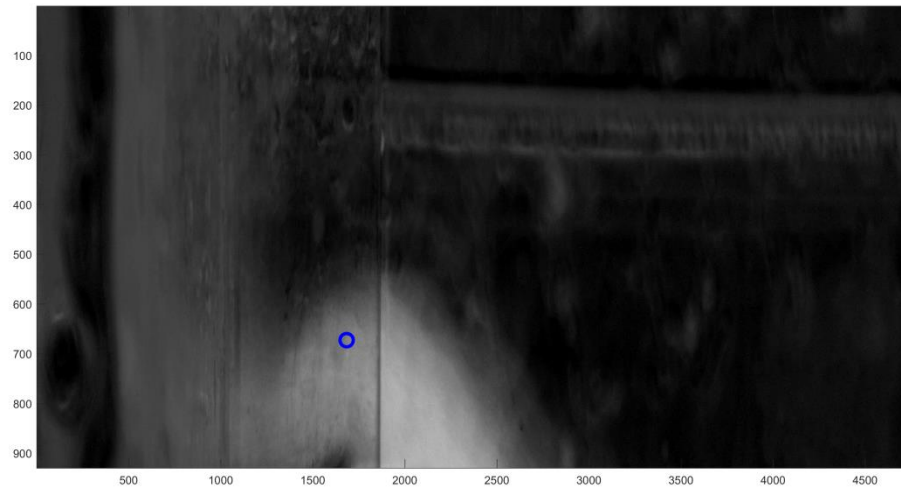


Figura 3.14- Localização do ponto selecionado através do procedimento apresentado na Figura 3.13.

Por último, a metodologia c) 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 máximo na imagem, representado na Figura 3.15.

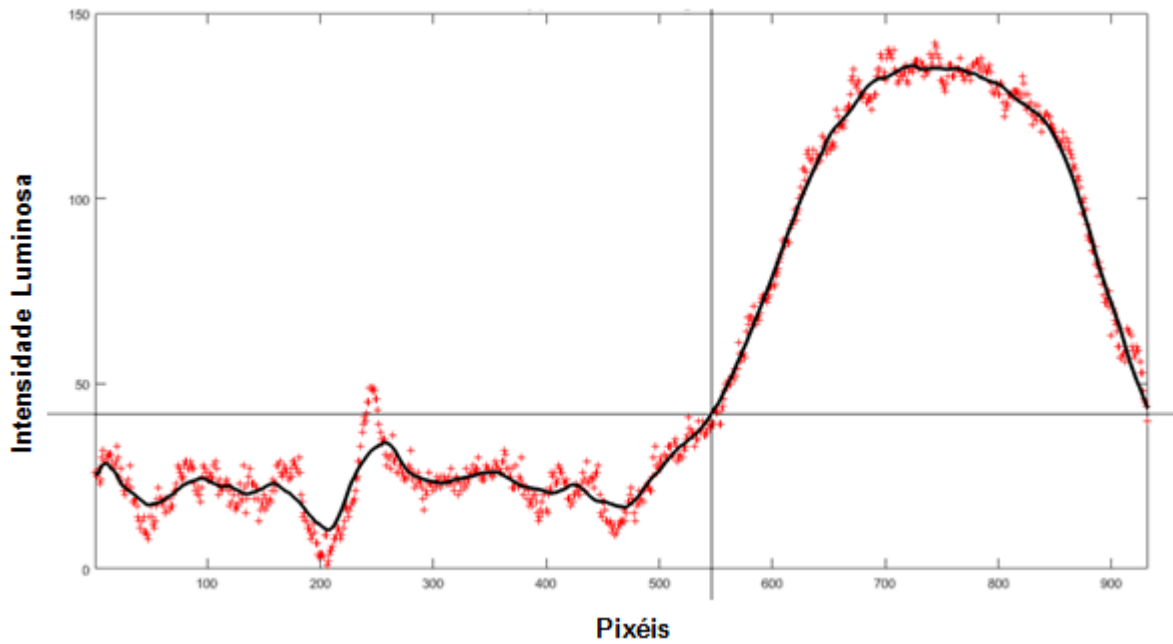


Figura 3.15- Definição do limite de integração – metodologia c) ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

Os valores de h_0 , obtidos para três condições distintas, estão apresentados no quadro 3.3, bem como o valor do alcance esperado, calculado através da expressão (2.2).

Quadro 3.3- Valores de h_0 e L_e para as três metodologias.

	h_0 (cm)			L_e (cm)		
	$h_{0,1}$	$h_{0,2}$	$h_{0,3}$	$L_{e,1}$	$L_{e,2}$	$L_{e,3}$
Método a)	1,384	1,264	1,321	15,610	22,332	11,071
Método b)	1.861	2,061	1,632	10,773	11,843	8,586
Método c)	1.492	1,545	1,556	14,180	17,077	9,086

Os valores dos alcances apresentados, para os três métodos, no quadro 3.3 encontram-se representados na Figura 3.16, em comparação com os valores obtidos experimentalmente.

Como se pode observar no gráfico da Figura 3.16, existe uma maior proximidade do alcance medido com o valor do alcance teórico, correspondente ao método b), do que com o alcance teórico correspondente aos métodos a) e c). Deste modo, optou-se por aplicar a metodologia b) para a determinação da altura do escoamento na secção de saída do trampolim nas restantes condições estudadas.

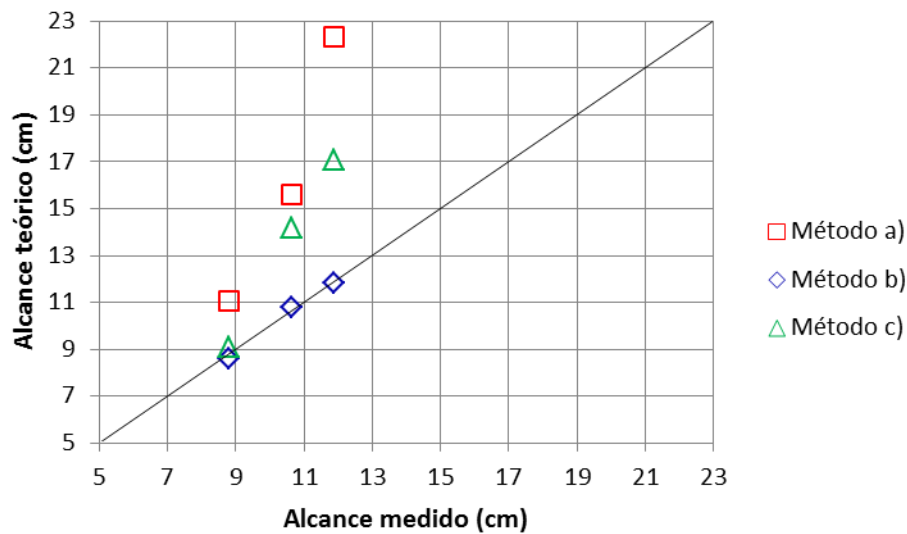


Figura 3.16- Relação entre o alcance teórico e o alcance medido para os diferentes métodos de determinação de h_0 .

3.5.3. DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DA ESCAVAÇÃO

O objetivo primordial do presente estudo é analisar a erosão do leito devida à ação do jato, para diferentes condições de escoamento. Para tal, torna-se necessário proceder à medição da profundidade da escavação de erosão bem como da altura da barra formada a jusante.

O método utilizado é de simples aplicação e consiste na utilização de uma régua em perspex, na qual foram introduzidas 66 varetas, espaçadas de 2 cm. As varetas tinham a possibilidade de serem ajustadas consoante a configuração do leito, permitindo assim definir facilmente o perfil longitudinal

da escavação de erosão. No final de cada ensaio, apoiava-se a régua no topo do trampolim e numa barra fixada nas paredes da bacia, na zona de jusante, como se pode visualizar na Figura 3.17.



Figura 3.17- Modo de fixação da régua utilizada para o levantamento do perfil longitudinal da escavação de erosão.

Definindo a distância da face inferior da régua até ao nível de referência do leito, isto é, até ao nível do leito antes do ensaio ser realizado, T , e medindo a distância, no final de cada ensaio e com recurso a uma fita métrica, da face inferior da régua até ao fundo da fossa de erosão, F , foi possível determinar a profundidade da escavação de erosão, f , através da seguinte relação:

$$f = F - T \quad (3.8)$$

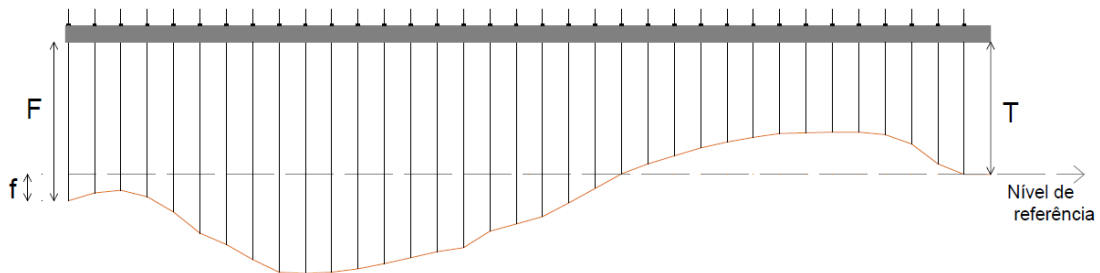


Figura 3.18- Esquema com as variáveis necessárias para o cálculo das profundidades da fossa de erosão.

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 3.4.

Quadro 3.4- Valores do parâmetro T para os diferentes modelos de trampolim utilizados.

α (°)	T (cm)
20	10
25	10,4
30	10,7
45	11,9

Para a medição da largura e a extensão da escavação de erosão, tendo também em consideração a barra formada a jusante, utilizou-se apenas uma fita métrica.

3.5.4. MEDIÇÃO DO VOLUME E CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO

Para duas condições específicas procedeu-se à configuração 3D da escavação e à determinação do respetivo volume. Para tal, recorreu-se a duas metodologias distintas.

A primeira consistiu no levantamento dos perfis longitudinais de erosão para toda a escavação e no tratamento dos respetivos resultados experimentais através de um código desenvolvido em Matlab.

A segunda metodologia foi aplicada apenas a uma situação e consistiu na leitura direta do molde em gesso (Figuras 3.19 e 3.20) por meio de um scanner 3D, TRIPLE Scan da ATOS, disponível no Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). O scanner 3D é um equipamento que permite construir um modelo digital a partir da leitura de um objeto real. Para a leitura do ficheiro pelo INEGI recorreu-se ao programa Slic3r.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos procedeu-se à determinação do volume da escavação, através dos moldes em gesso realizados, tendo como fundamento o princípio de Arquimedes. A quantificação do volume deslocado foi realizada no reservatório calibrador, por este possuir uma escala nos tubos piezométricos, facilitando assim a medição dos volumes.



Figura 3.19 – Molde, em gesso, da escavação resultante ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).



Figura 3.20 - Molde, em gesso, da escavação resultante ($\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

3.6. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

A calibração é uma etapa fundamental na realização de trabalhos experimentais, pois tem como objetivo assegurar o correto funcionamento dos equipamentos de medição.

3.6.1. MEDIDOR DE CAUDAIS

Para a calibração do medidor de caudais recorreu-se a um reservatório calibrador, constituído por dois corpos gémeos, que permite a medição dos volumes de água nele contidos através das escalas dos tubos piezométricos colocados na superfície exterior das suas paredes. O reservatório foi alimentado por meio de uma mangueira ligada ao sistema de tubagens da instalação experimental para permitir a leitura do caudal através do caudalímetro, passando o circuito hidráulico a trabalhar em circuito aberto.

O procedimento adotado pode ser descrito em oito passos:

- a) Regular a válvula para o valor de caudal desejado, neste caso de 0,2 L/s, tendo em conta o valor lido no visor do caudalímetro. É importante assegurar a existência de um equilíbrio no reservatório de alimentação, de forma a não alterar o ponto de funcionamento da bomba. Esse equilíbrio é conseguido quando o caudal que chega ao reservatório de alimentação é aproximadamente igual ao elevado pela bomba para o reservatório calibrador.
- b) Proceder ao enchimento do reservatório calibrador até um volume inicial de 20 L (volume a partir do qual a leitura do valor é mais facilitada).
- c) Contabilizar o tempo necessário para um acréscimo de 20 L, com recurso a um cronómetro.
- d) Repetir o passo c) 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 10 s.
- f) Leitura direta de 15 valores no visor do equipamento, apenas para controlo e comparação com os valores dos caudais determinados com recurso ao reservatório calibrador.
- g) Repetir o procedimento para os seguintes caudais: 0,4 L/s, 0,6 L/s, 0,8 L/s e 1,0 L/s.
- h) Tratamento dos dados obtidos com o recurso ao Microsoft Excel.

No quadro 3.5 encontram-se as características das escalas de medição utilizadas.

Quadro 3.5 – Características das escalas de medição utilizadas.

Equipamento	Menor divisão de escala	Erro de leitura
Reservatório calibrador	0,5 L	± 0,25 L
Cronómetro	0,01 s	± 0,01 s
Visor caudalímetro	0,0001 L/s	± 0,0001 L/s

No quadro 3.6 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 3.7.

Quadro 3.6- Registo dos intervalos de tempo, em segundos, para o enchimento de 20 L no reservatório.

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
103,37	49,71	32,85	24,55	19,33
102,83	49,68	32,61	24,77	19,24
103,4	50,67	32,7	25,03	19,4
103,33	50,7	33,11	24,37	19,49

Quadro 3.7- 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	0,1935	0,4023	0,6088	0,8147	1,0347
2	0,1945	0,4026	0,6133	0,8074	1,0395
3	0,1934	0,3947	0,6116	0,7990	1,0309
4	0,1936	0,3945	0,6040	0,8207	1,0262
Valor médio (L/s)	0,1937	0,3985	0,6095	0,8105	1,0328

Os valores dos caudais obtidos por leitura direta no visor do caudalímetro são apresentados no quadro 3.8.

Quadro 3.8- 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	0,1961	0,3962	0,6027	0,8033	1,016
2	0,1985	0,3982	0,5989	0,8098	1,02
3	0,1969	0,3989	0,6107	0,8106	1,017
4	0,197	0,3978	0,6001	0,7963	1,024
5	0,2	0,3991	0,6065	0,8017	1,009
6	0,2031	0,4028	0,5979	0,7982	1,014
7	0,1987	0,396	0,6039	0,7965	1,028
8	0,1979	0,3996	0,6069	0,7891	1,019
9	0,2016	0,4043	0,6006	0,7975	1,015
10	0,2004	0,4024	0,5988	0,8018	1,022
11	0,199	0,401	0,6016	0,8084	1,014
12	0,2011	0,3999	0,6031	0,8056	1,022
13	0,198	0,397	0,599	0,7989	1,015
14	0,1999	0,4004	0,6021	0,8105	1,014
15	0,1989	0,3991	0,5988	0,7916	1,026
Valor médio (L/s)	0,1991	0,3995	0,6021	0,8013	1,0183
σ (L/s)	0,00184	0,00231	0,00353	0,00652	0,00508

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 3.21. A análise da Figura 3.21 permite comprovar a semelhança entre os valores, o que traduz o bom funcionamento do caudalímetro.

A curva de calibração do medidor de caudais, representada na Figura 3.22, foi determinada com base nos valores dos caudais apresentados no quadro 3.7. e dos valores registados a partir do sistema de aquisição de dados, apresentados no quadro 3.9. 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) e Antunes (2012)), confirma a fiabilidade da mesma.

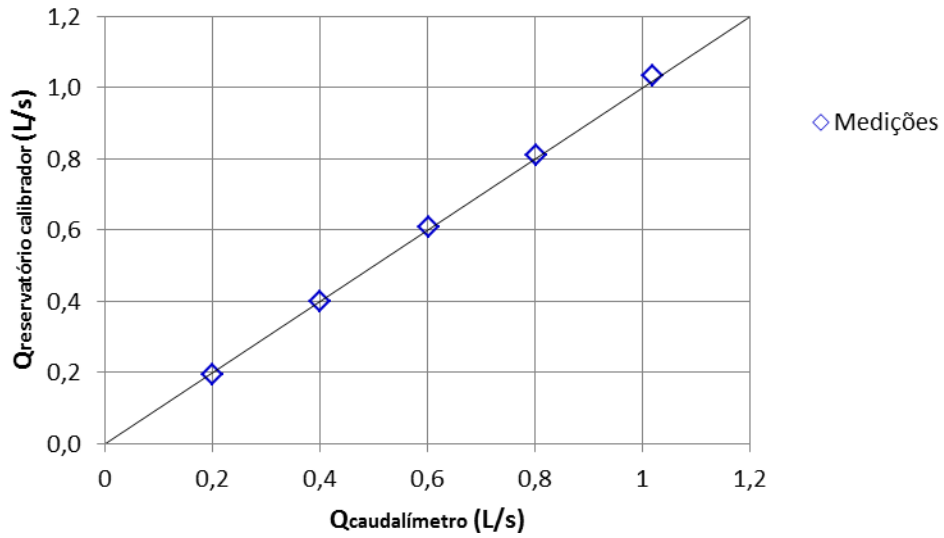


Figura 3.21- Comparação entre os caudais lidos diretamente no caudalímetro e os caudais medidos em recurso ao reservatório calibrador.

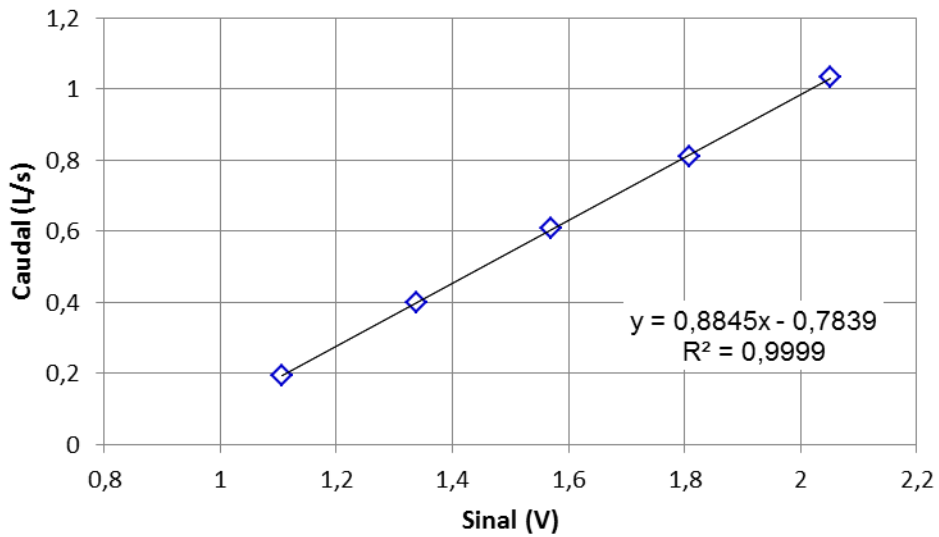


Figura 3.22- Curva de calibração.

Quadro 3.9- Valores médios e desvio padrão dos valores registados, em volt, com recurso ao software LabView 8.6.

	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
Valor médio (V)	1,1057	1,3377	1,5704	1,8084	2,0519
σ (V)	0,00276	0,00256	0,00265	0,00304	0,00333

3.6.2. IMAGEM DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Como referido em 3.5.2.1, é necessário recorrer a uma imagem de calibração para que a técnica de aquisição de imagens seja corretamente aplicada. Essa imagem deve possuir uma escala de comprimentos físicos, dada pela existência de uma régua ou pelo conhecimento das dimensões físicas de um dado objeto.

No presente estudo tomou-se como referência a dimensão horizontal da placa de perspex na zona do trampolim em salto de esqui, cujo comprimento é de 6,5 cm.

Apesar de terem sido tomados os cuidados necessários para que a máquina fotográfica ficasse igualmente posicionada em todos os ensaios, é difícil conseguir que as coordenadas da imagem sejam exatamente iguais de ensaio para ensaio, não havendo por isso um fator de calibração único. Note-se que o fator de calibração horizontal é igual ao fator de calibração vertical.

Na Figura 3.23 apresenta-se um exemplo da imagem de calibração para uma condição.

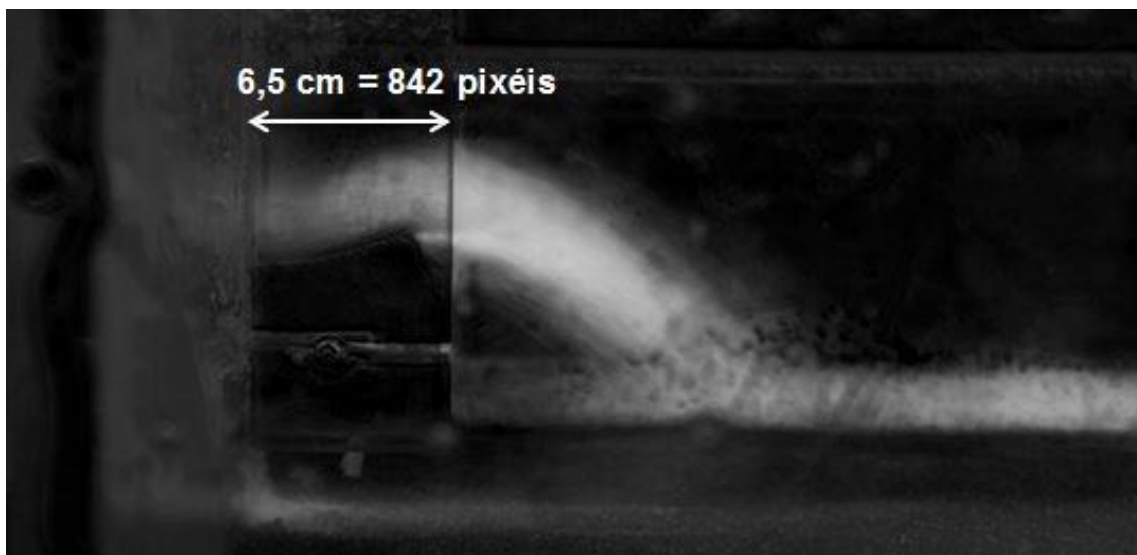


Figura 3.23 – Exemplo de uma imagem de calibração.

Para a obtenção das dimensões físicas das variáveis a medir na imagem, basta multiplicar as dimensões em pixéis pelo fator de calibração determinado para cada condição. No anexo C encontram-se o quadro com os fatores de calibração para cada uma das condições estudadas.

4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DE DADOS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais efetuados no laboratório de Hidráulica, são apresentados no presente capítulo. É realizada uma análise crítica dos resultados, com o propósito de facilitar a compreensão dos mesmos e também dos fenómenos em análise neste trabalho.

Os ensaios realizados, para as diferentes condições, permitiram determinar 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 e também as dimensões das escavações de erosão e o seu respetivo volume.

Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos pelas expressões empíricas e semiempíricas apresentadas no capítulo 2.

Procedeu-se também a uma análise comparativa entre os resultados adquiridos no presente estudo, e os obtidos por Figueiredo (2010) no estudo realizado sobre dissipação de energia a jusante de um descarregador de cheias não convencional, no qual foi utilizada a mesma instalação experimental, à exceção da bacia de restituição, cujas dimensões eram inferiores.

4.2. CONDIÇÕES DE TESTE

As condições de teste adotadas tiveram como base o estudo levado a cabo por Figueiredo (2010), possibilitando assim a realização de uma análise comparativa, como referido em 4.1.

Dadas as maiores dimensões da bacia de restituição, a gama de caudais a testar deveria ser mais alargada. No entanto, com a realização de alguns ensaios preliminares, verificou-se que o caudal máximo escoado, sem que houvesse realimentação da escavação de erosão com os sedimentos já erodidos, seria o caudal máximo utilizado por Figueiredo (2010), $Q = 0,85$ L/s.

A realimentação é justificada pela existência de correntes de recirculação, devido à influência das paredes da bacia de restituição. Estas são responsáveis por transportar o material já erodido novamente para montante. Deste modo, o desenvolvimento da erosão fica comprometido, não correspondendo à correta evolução das dimensões da escavação. Nas Figuras 4.1 e 4.2 pode-se visualizar as diferentes configurações da escavação no caso de ocorrer, ou não, a realimentação da mesma.



Figura 4.1 – Escavação sem realimentação ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

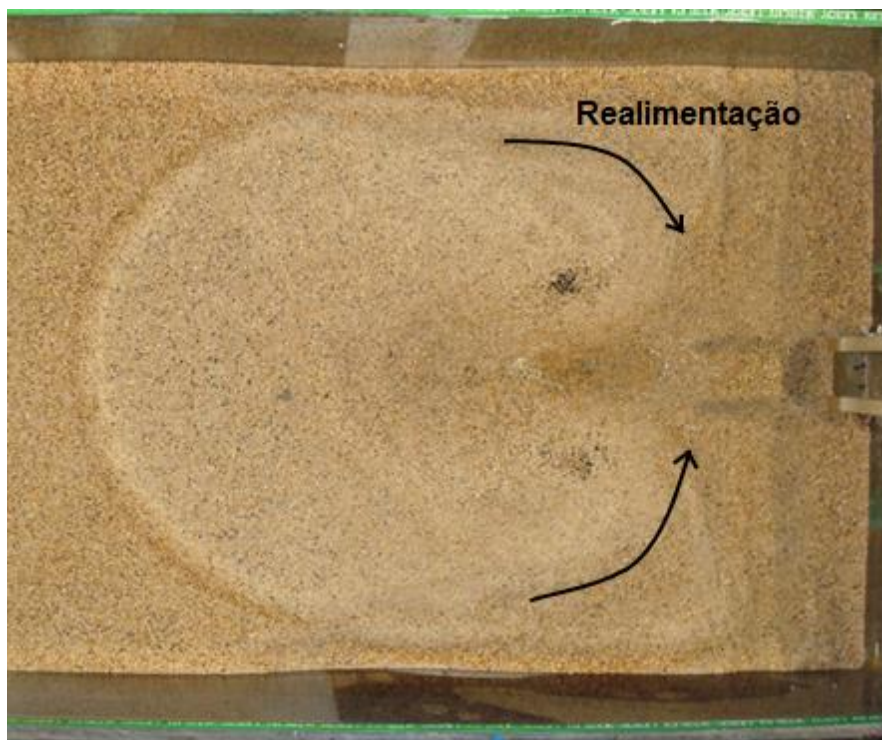


Figura 4.2 – Escavação com realimentação ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,99$ L/s e $h = 3$ cm).

Também nos ensaios preliminares foi definida a duração de cada ensaio, tendo sido fixada em duas horas. Optou-se por não considerar a mesma duração que Figueiredo (2010), uma hora, uma vez que,

para o caudal mais elevado e menor espessura do colchão de água, esta não seria suficiente para garantir a estabilização da escavação e da barra formada a jusante.

Note-se que, apesar de existir realimentação, foram utilizados caudais superiores nos ensaios em que foram utilizados os modelos de trampolim com $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$, visto ser o caudal a partir do qual não se verifica o afogamento do escoamento.

No quadro 4.1, apresentam-se os valores utilizados em modelo para o caudal, Q , caudal por unidade de largura, q , espessura do colchão de água, h , e os diferentes ângulos de saída do trampolim, α . São também apresentados os valores correspondentes em protótipo, segundo o critério de semelhança de Froude.

Quadro 4.1- Condições de teste.

Variável	Modelo	Protótipo
Q (L/s)	0,51	5161
	0,71	7185
	0,85	8601
	1,1	11131
	1,19	12041
q (m ² /s)	10,2	2,580
	14,2	3,592
	17	4,301
	22	5,566
	23,8	6,021
h (m)	0,01	0,4
	0,03	1,2
	0,05	2
α (°)	20	20
	25	25
	30	30
	45	45

4.3.DETERMINAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS

O conhecimento das características do jato, nas diferentes condições de escoamento, é fundamental para que se possa realizar uma análise, não só do comportamento do jato, mas também do desenvolvimento da erosão no leito devido à ação do mesmo.

4.3.1.REGISTO DAS COORDENADAS DAS TRAJETÓRIAS DOS JATOS

A medição da trajetória real do jato foi realizada recorrendo à TAI e, posteriormente, a um código escrito em Matlab. A definição das envolventes do jato permitiu obter, para cada ensaio realizado, a trajetória média do jato, como descrito em 3.5.2.1.

Paralelamente, procedeu-se ao cálculo das coordenadas da trajetória do jato, recorrendo à expressão (2.1).

Para a aplicação das expressões (2.1) e (2.2) é necessário conhecer o valor da velocidade do escoamento na secção de saída do trampolim, U_0 , a altura de queda na mesma secção, H_0 , e o valor de H_1 , que depende da espessura do colchão de água. Tendo em consideração a geometria da secção de saída do trampolim, nomeadamente a sua largura, b , o caudal escoado, Q , e a altura de água, h_0 , é possível determinar U_0 através da equação (2.6) e H_0 através da expressão (2.3).

Por sua vez, a medição da altura de água na secção de saída do trampolim foi também realizada com o recurso à TAI. Através de um código desenvolvido em Matlab, foram medidas as alturas de água para todos os ensaios realizados, sendo apresentado no quadro 4.2 os seus valores médios, para os vários caudais estudados e para os diferentes modelos de trampolim utilizados.

No quadro 4.2 apresenta-se também os valores das restantes variáveis necessárias para a aplicação das expressões (2.1) e (2.2).

Na Figura 4.3 encontra-se uma representação gráfica da trajetória real e da trajetória do jato obtida pela expressão (2.1), para a condição $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s.

Como se pode observar na Figura 4.3, no que se refere ao alcance do jato, a trajetória medida aproxima-se da trajetória esperada. No entanto, é importante realçar que a equação (2.1) se baseia apenas em aspetos cinemáticos, não considerando, por isso, a espessura e dispersão do jato. A diferença verificada na zona inicial está relacionada com o facto de o jato ser espesso e o ponto inicial não ser o mesmo (na trajetória medida o ponto inicial coincide com o ponto médio da lâmina de água).

Quadro 4.2- Variáveis necessárias para aplicação das expressões (2.1) e (2.2).

α (°)	Q (L/s)	h (m)	$h_{0, \text{médio}}$ (cm)	$U_{0, \text{médio}}$ (m/s)	$H_{0, \text{médio}}$ (m)	H_1 (m)
20	0,51	0,01	1,63	0,63	0,020	0,09
		0,03				0,07
		0,05				0,05
	0,71	0,01	1,91	0,75	0,029	0,09
		0,03				0,07
		0,05				0,05
	0,85	0,01	2,05	0,83	0,036	0,09
		0,03				0,07
		0,05				0,05
25	0,71	0,01	2,09	0,69	0,024	0,094
		0,03				0,074
		0,05				0,054
	0,85	0,01	2,11	0,81	0,034	0,094
		0,03				0,074
		0,05				0,054
30	0,71	0,05	2,53	0,61	0,019	0,057
	1,1	0,05	2,46	0,90	0,041	0,057
45	0,71	0,05	2,51	0,57	0,016	0,069
	1,19	0,05	2,50	0,96	0,025	0,069

Deste modo, assumiu-se que a trajetória medida através do código desenvolvido em Matlab é suficientemente precisa para caracterizar o jato, pois além de se aproximar da trajetória teórica tem a vantagem de considerar os fenômenos ocorrentes durante o ensaio.

Os valores correspondentes às coordenadas da trajetória para as diferentes condições estudadas apresentam-se no anexo D. Note-se que, o referencial que se assumiu para a representação das trajetórias é o nível do leito na posição inicial uma vez que os modelos do trampolim em salto esqui têm alturas diferentes.

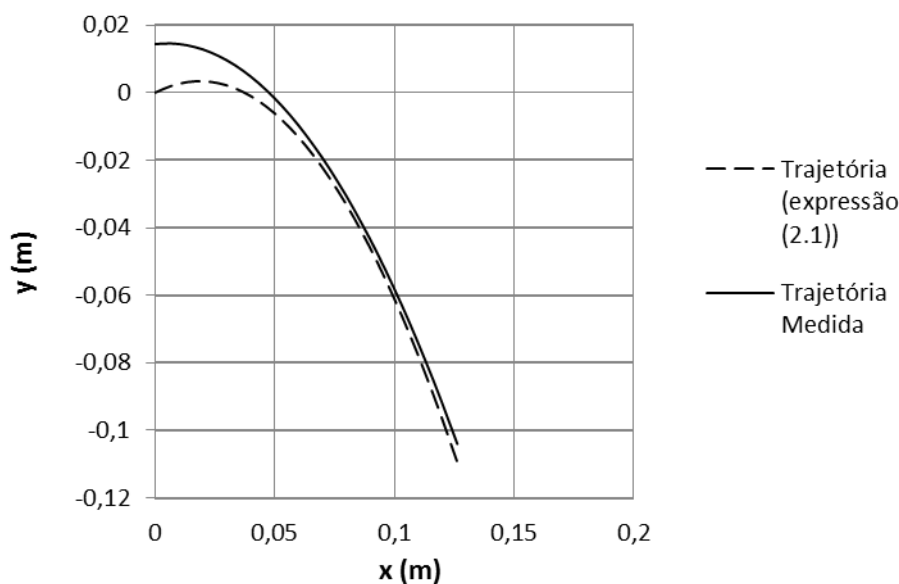


Figura 4.3- Representação gráfica das trajetórias do jato ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s).

4.3.2. DETERMINAÇÃO DO ALCANCE DO JATO

A expressão (2.2) permite determinar o valor teórico do alcance do jato. No entanto, dado à possibilidade de haver alterações na trajetória devido aos fenômenos ocorrentes durante a propagação do jato, torna-se necessário proceder à sua correção. Para o efeito, utilizaram-se as correções expostas no capítulo 2, à exceção das apresentadas por Zvorykin et al. (1975) e por Kamanave (1966), por não serem aplicáveis ao presente estudo. No primeiro caso, os limites de aplicabilidade não são respeitados e no segundo caso, a correção é válida apenas para jatos horizontais.

O valor máximo de U_0 verificado neste estudo foi de 6,05 m/s (valor correspondente no protótipo), logo, a correção apresentada por Kawakami (1973) não introduz nenhuma alteração ao valor do alcance teórico pois, para que tal acontecesse, U_0 teria que ser superior a 15 m/s.

O mesmo acontece nas correções sugeridas por Gun'ko et al. (1965) e Taraimovich (1978), dado que o número de Froude, Fr , máximo obtido foi de 3,74, valor muito inferior aos estipulados pelos autores. Para que houvesse uma redução do alcance teórico, os números de Froude teriam de tomar valores superiores a 30 e 50, respetivamente.

Paralelamente à medição do alcance do jato, procedeu-se à medição do ângulo de incidência, α' , na zona de impacto do jato com o colchão de água, 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 no quadro 4.2, foi possível determinar os valores teóricos do ângulo de incidência do jato, α'_t .

Nas Figuras 4.4 e 4.5 encontram-se duas representações gráficas, onde se procede à comparação dos alcances medidos com os alcances teóricos e dos ângulos de incidência medidos com os ângulos de incidência teóricos, ambas para os diferentes caudais e espessuras do colchão de água estudados com recurso ao modelo de trampolim de 20° .

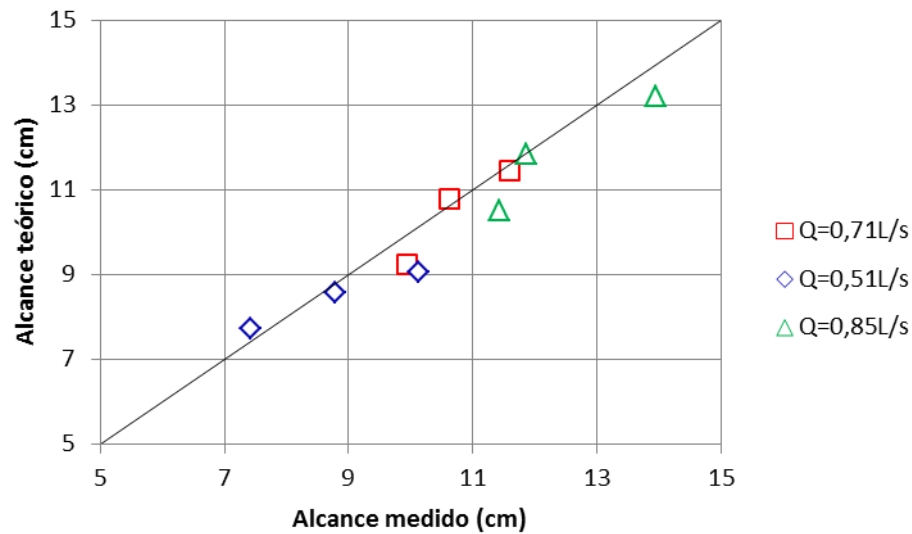


Figura 4.4- Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI.

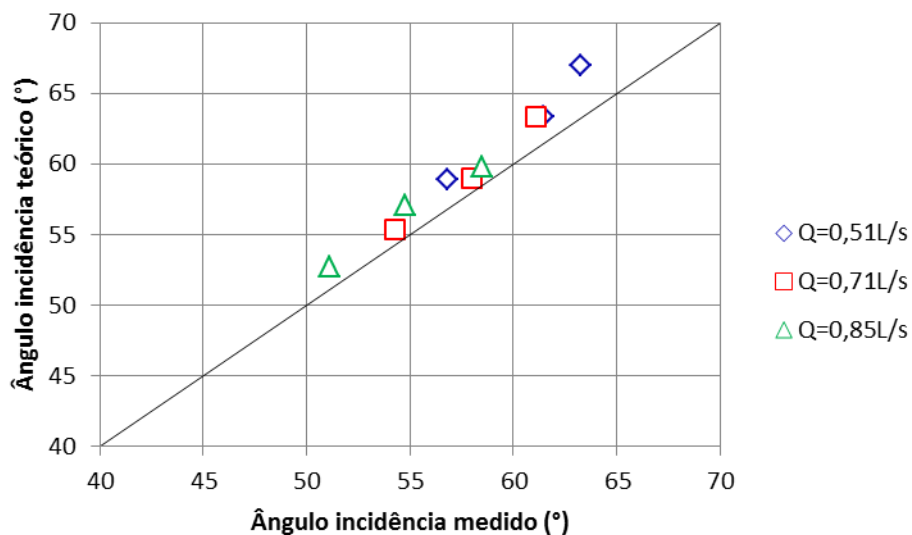


Figura 4.5- Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI.

Através da análise das Figuras 4.4 e 4.5, pode-se verificar que existe uma discrepância de 10% e 5%, entre os alcances e ângulos de incidência teóricos e os alcances e ângulos de incidência medidos com recurso à TAI, respetivamente. No anexo D encontram-se as representações gráficas para os restantes modelos de trampolim, bem como os quadros com os valores de L_t , L_{medido} , α'_t e α'_{medido} .

Como foi mencionado em 3.5.2.2, o processo de determinação da altura de água na secção de saída do trampolim foi condicionado pela dificuldade existente em definir a altura da lâmina de água pela imagem. Uma alteração de 1 % no valor de h_0 , medido na imagem, irá originar uma diferença de aproximadamente 1,3 % nos valores teóricos do alcance e do ângulo de incidência. No presente estudo, as diferenças verificadas entre os valores obtidos pelas expressões (2.2) e (2.4) e os medidos não são muito significativas.

4.4. PERFIL LONGITUDINAL DA ESCAVAÇÃO

4.4.1. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO COLCHÃO DE ÁGUA

Na Figuras 4.6 e 4.7 estão representados os perfis de erosão resultantes do ensaio realizado com o trampolim de $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, respetivamente, para o caudal de 0,71 L/s e para as diferentes espessuras do colchão de água.

Como era esperado, a profundidade máxima de escavação vai diminuindo com o aumento da espessura do colchão de água, dado o efeito amortecedor que este possui. Note-se que a atenuação das flutuações turbulentas, devido à ação do jato, é tanto maior, quanto maior for a espessura do colchão de água. Consequentemente, a altura da barra formada a jusante da escavação, diminui com o decréscimo da espessura do colchão de água, sendo os sedimentos transportados para jusante, originando assim uma barra mais extensa. Pode ainda constatar-se que, nos perfis de erosão correspondentes a $h = 3$ cm e $h = 5$ cm não existe uma diferença muito notória. Nas restantes condições estudadas, verificou-se um comportamento semelhante do desenvolvimento da erosão. Os dados relativos aos restantes perfis da escavação foram organizados em quadros, que se encontram no anexo E, bem como as respetivas representações gráficas.

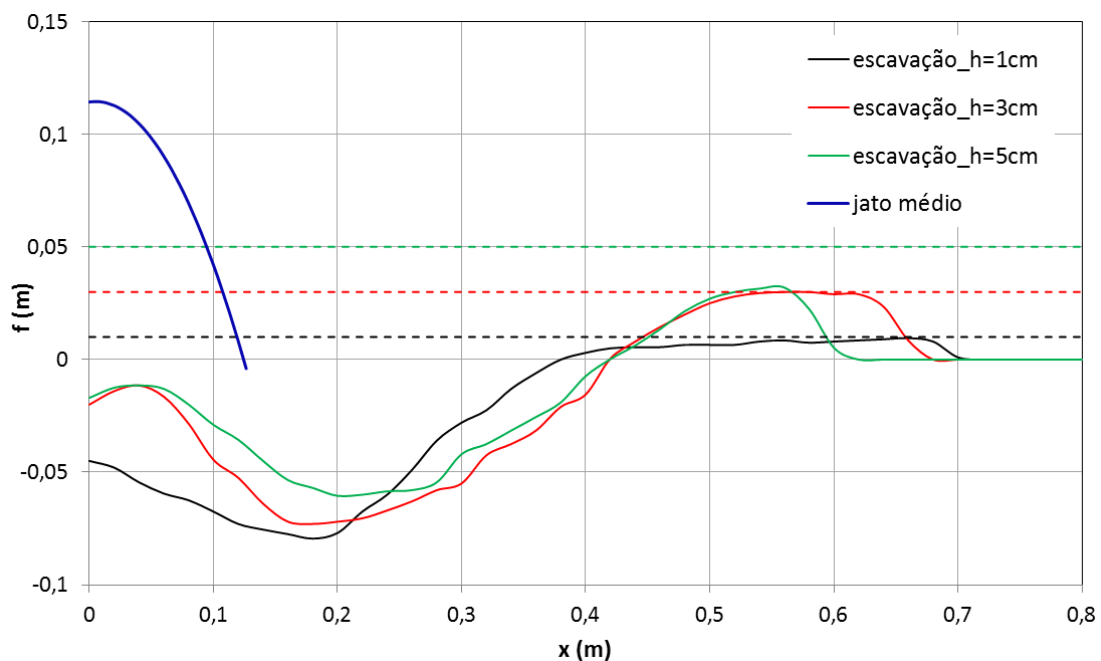


Figura 4.6- Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha = 20^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s.

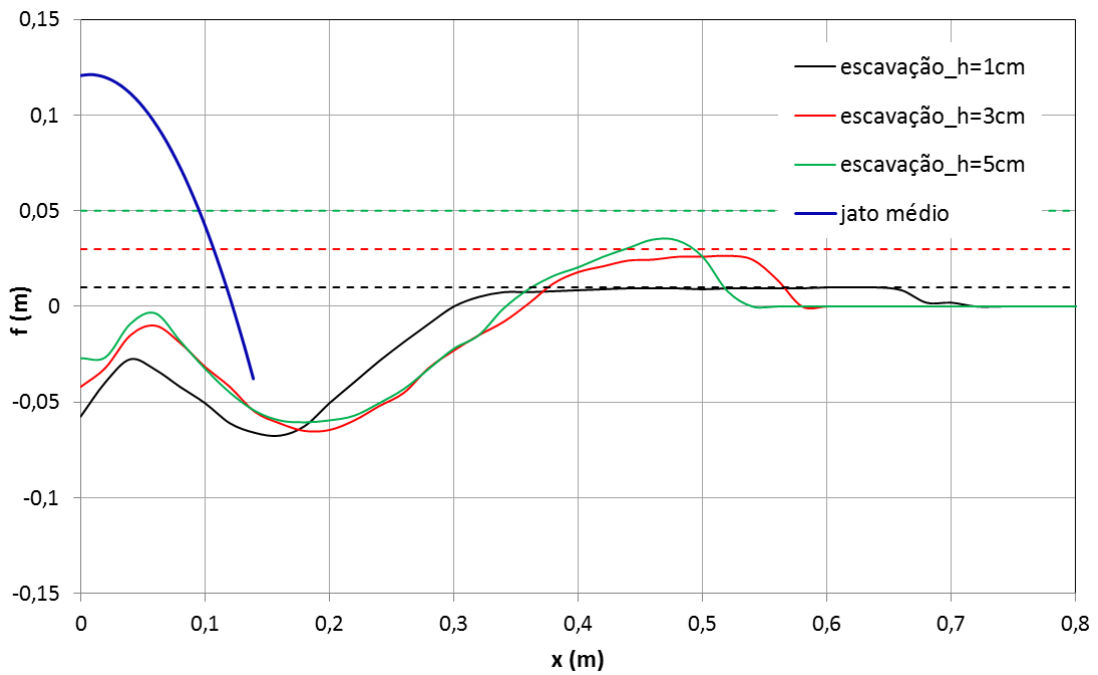


Figura 4.7- Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha = 25^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s.

Os resultados obtidos no presente estudo foram comparados com os resultados obtidos por Figueiredo (2010). Os perfis apresentados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 dizem respeito aos ensaios realizados para $\alpha = 20^\circ$ com caudais de 0,51 L/s, 0,71 L/s e 0,85 L/s, respetivamente.

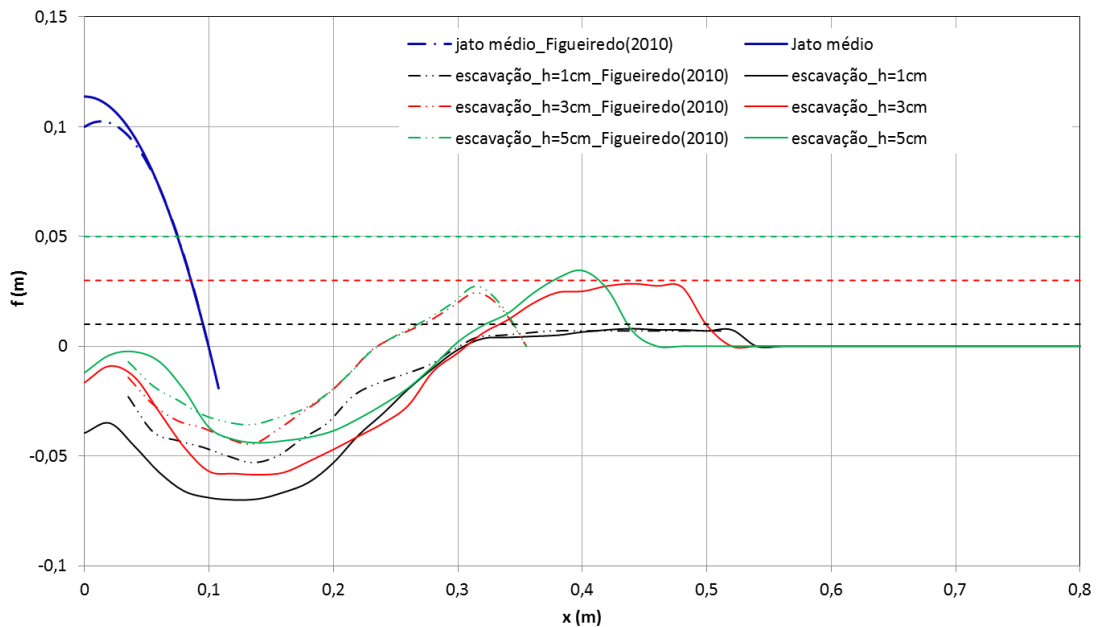


Figura 4.8- Comparação dos perfis de escavação para $Q = 0,51$ L/s com Figueiredo (2010).

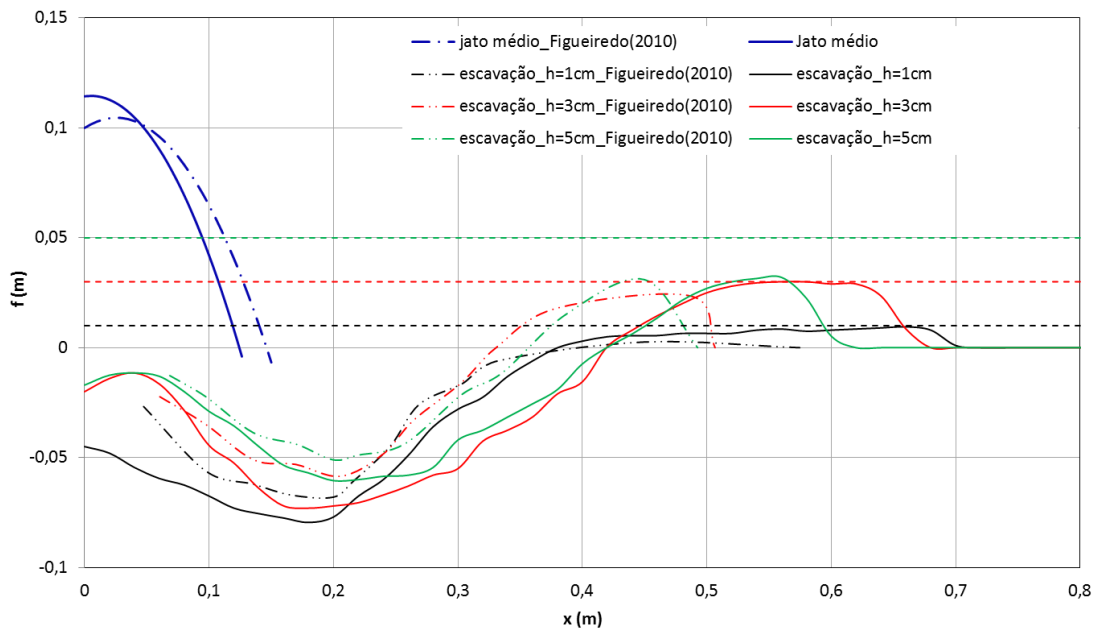


Figura 4.9- Comparação dos perfis de escavação para $Q = 0,71 \text{ L/s}$ com Figueiredo (2010).

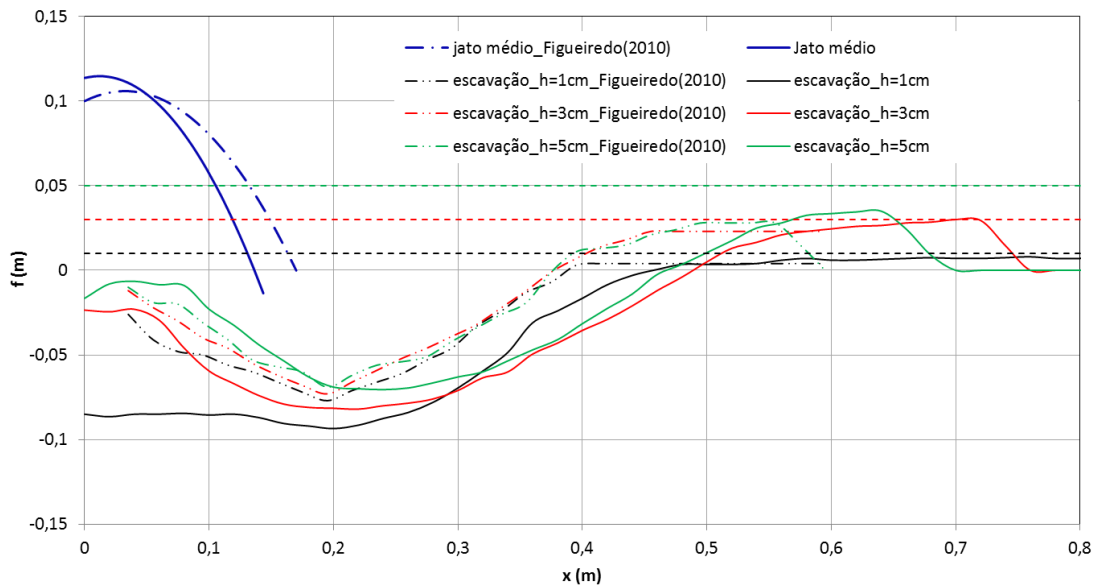


Figura 4.10- Comparação dos perfis de escavação para $Q = 0,85 \text{ L/s}$ com Figueiredo (2010).

É de notar que as dimensões do material granular utilizado são inferiores às do material utilizado no estudo de Figueiredo (2010), o que se reflete numa maior facilidade de transporte dos sedimentos. As diferenças registadas nos perfis de erosão podem ser justificadas por tal facto. Note-se ainda que a consideração de uma duração de ensaios superior e a existência de uma bacia de restituição com maiores dimensões também podem estar na base dessas diferenças.

Verifica-se também que existe uma discordância entre as trajetórias dos jatos, relativas a cada caudal estudado. O jato representado a traço contínuo, associado ao presente estudo, corresponde ao jato

médio determinado através da TAI enquanto o jato a traço interrompido, associado ao estudo de Figueiredo (2010), foi determinado através da expressão (2.1). Como referido em 4.3.1, esta expressão não tem em consideração os fenómenos que ocorrem no jato durante a sua projecção no ar. É também de realçar que a expressão (2.1) depende do valor da altura de água na secção de saída do trampolim, variável medida com recurso a duas técnicas distintas nos dois estudos. O facto de Figueiredo (2010) apresentar valores de h_0 inferiores, resulta em valores de U_0 superiores e, conseqüentemente, num maior alcance do jato.

Pode ainda constatar-se que, apesar de o jato não incidir na mesma zona, o ponto onde se verifica a profundidade máxima da escavação situa-se, aproximadamente, à mesma distância.

4.4.2. INFLUÊNCIA DO CAUDAL ESCOADO

A consideração de diferentes condições de escoamento, para a mesma espessura de colchão de água, permitiu analisar a sua influência no desenvolvimento da erosão.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 encontram-se as representações gráficas das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para a condição $h = 3$ cm, nos ensaios realizados com $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, respetivamente.

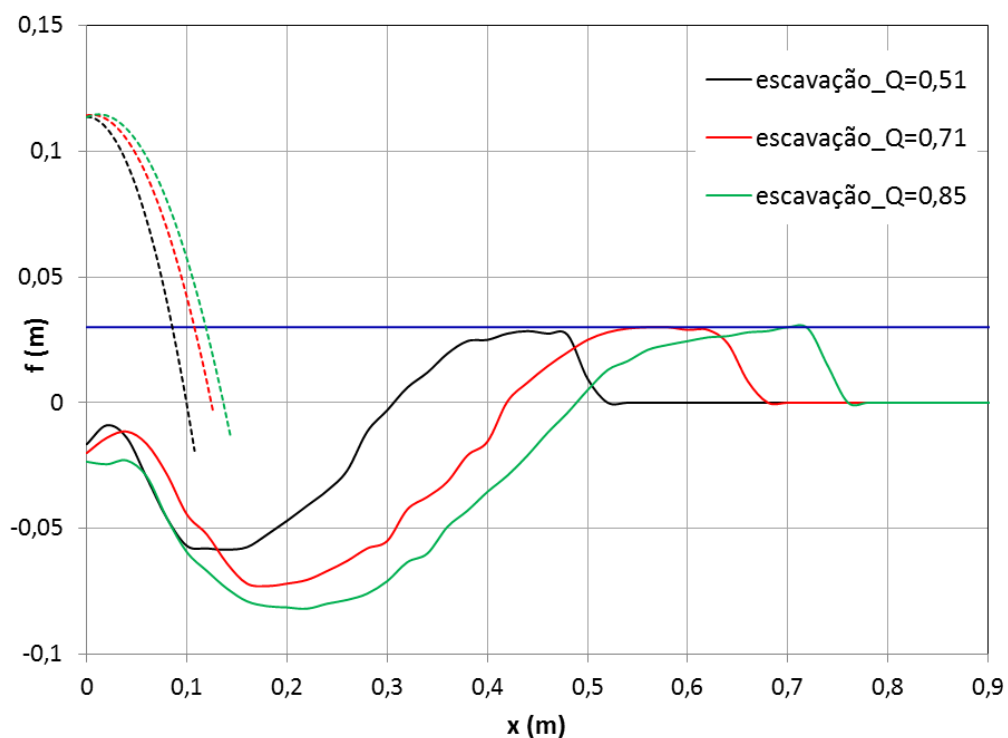


Figura 4.11- Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 20^\circ$ e $h = 3$ cm.

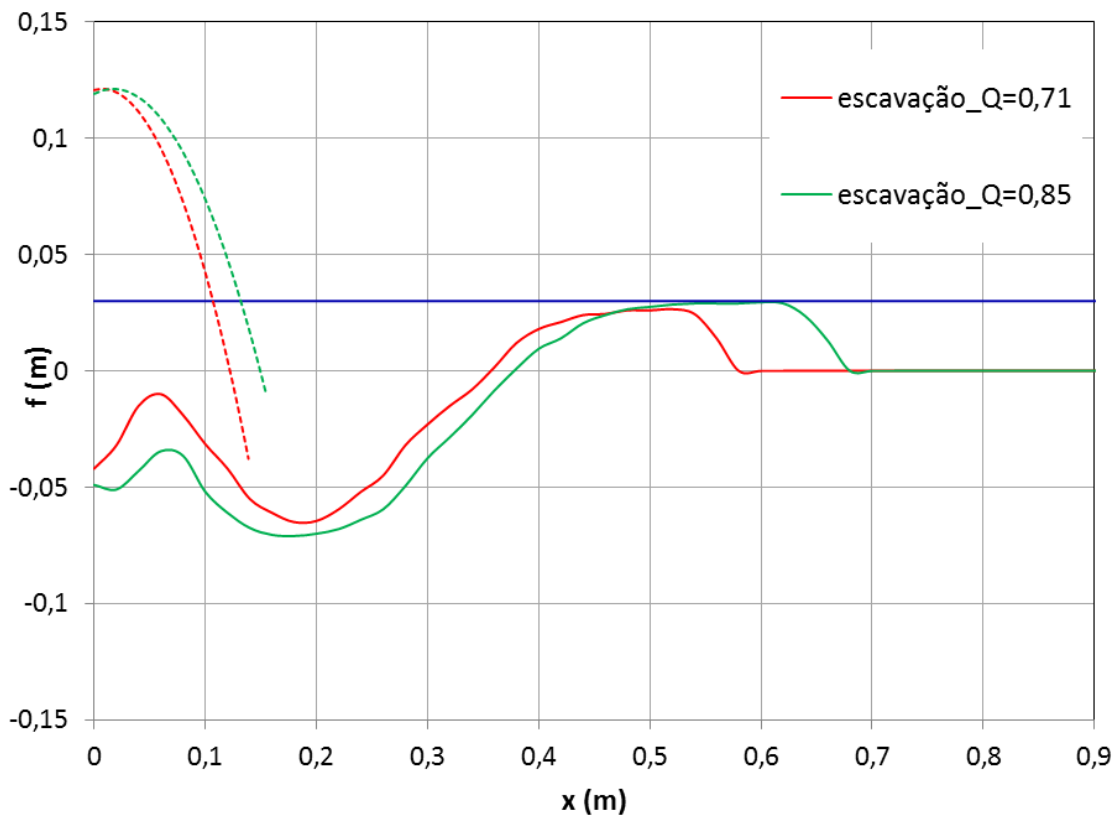


Figura 4.12- Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 25^\circ$ e $h = 3$ cm.

Pode verificar-se, pela observação das Figuras 4.11 e 4.12, que a erosão é mais acentuada para os caudais mais elevados. De facto, a velocidade do jato aumenta com o aumento do caudal, aumentando assim a capacidade de transporte dos sedimentos. Verifica-se também que a extensão da escavação aumenta gradualmente com o aumento do caudal, conduzindo, deste modo, a barra mais para jusante. Note-se que a velocidade do jato está igualmente relacionada com o alcance do jato, como constatado em 4.3.2. Com efeito, era esperado um aumento do alcance do jato com o aumento do valor do caudal.

Verifica-se ainda que, para qualquer caudal descarregado, a altura da barra fica limitada à altura do colchão de água de 3 cm. No entanto, para $h = 5$ cm observa-se que a altura da barra continua a ser aproximadamente igual a 3 cm (Figuras 4.13 e 4.14), parecendo não haver influência da espessura do colchão de água nestas situações. Este fator poderá estar relacionado com as características do escoamento, mais especificamente, com o transporte de sedimentos.

Pela observação das Figuras 4.11 a 4.14 ainda se pode constatar que o declive da escavação a montante da barra é semelhante em todas as situações. Para analisar melhor esta situação procedeu-se ao ajuste de uma reta aos declives da escavação e da barra e determinaram-se os respetivos ângulos, θ_1 e θ_2 , apresentados no quadro 4.3.

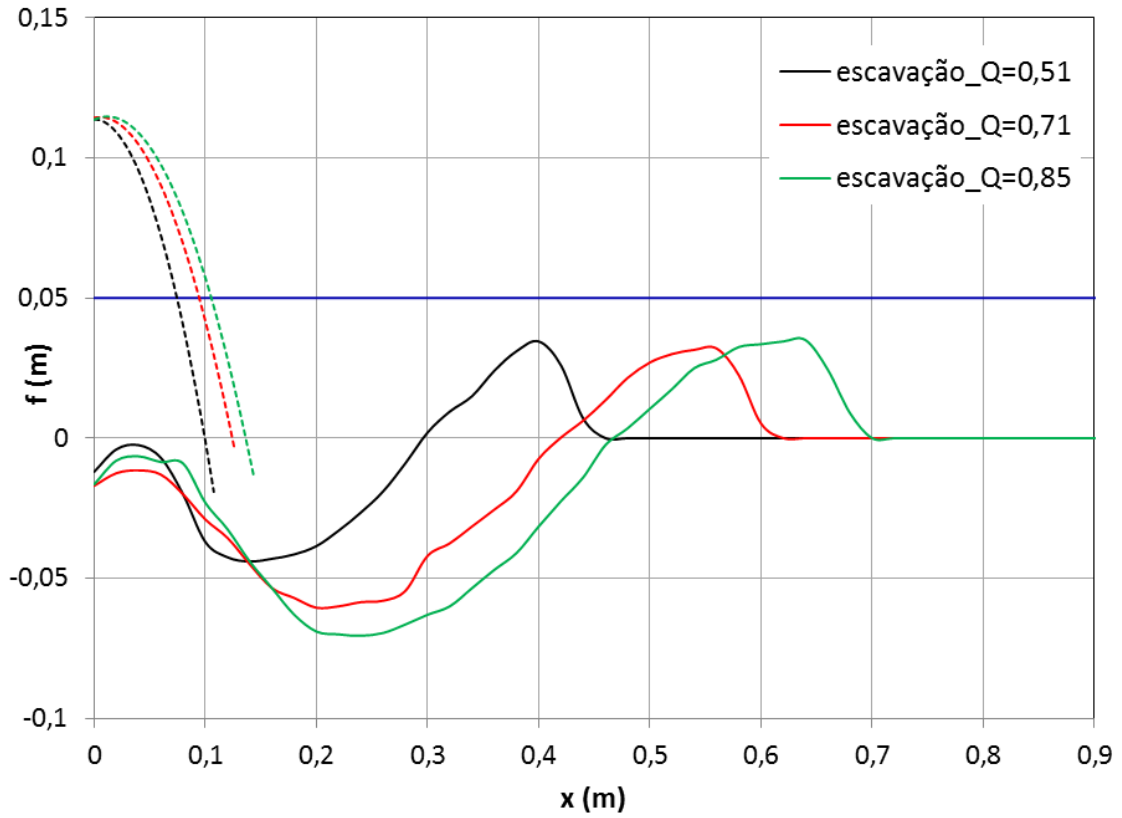


Figura 4.13 – Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 20^\circ$ e $h = 5$ cm.

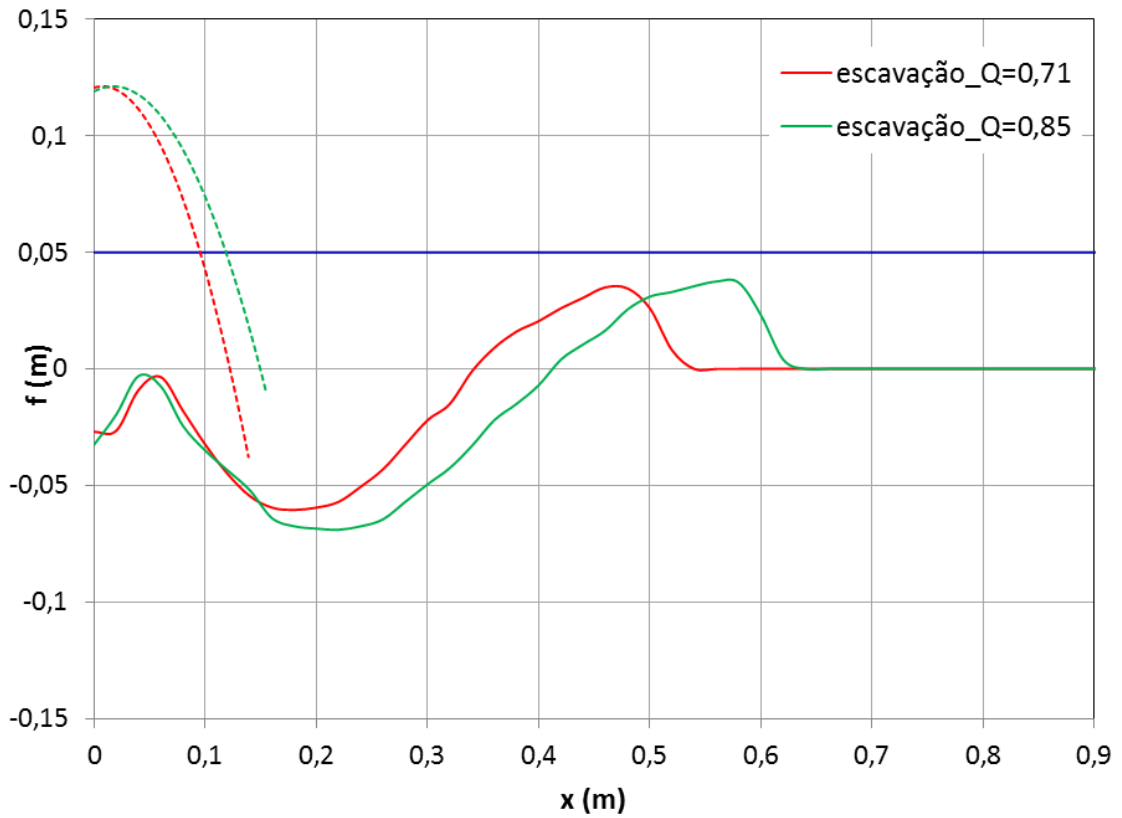


Figura 4.14 - Representação gráfica dos perfis de erosão para $\alpha = 25^\circ$ e $h = 5$ cm.

Quadro 4.3 – Valores dos ângulos associados aos declives da escavação a montante e a jusante da barra, θ_1 e θ_2 , respetivamente.

α (°)	Q (L/s)	h (m)	θ_1 (°)	θ_2 (°)
20	0,51	0,01	25,58	9,93
		0,03	21,89	34,02
		0,05	20,33	33,02
	0,71	0,01	18,70	11,31
		0,03	22,61	30,43
		0,05	22,09	29,36
	0,85	0,01	21,32	9,23
		0,03	20,72	36,41
		0,05	22,14	31,49
25	0,71	0,01	23,30	12,00
		0,03	22,97	31,49
		0,05	25,21	31,28
	0,85	0,01	23,83	13,36
		0,03	24,24	30,43
		0,05	22,36	33,02

Como se pode verificar, os valores de θ_1 são bastante semelhantes em todas as situações. No entanto, para θ_2 regista-se uma variação dos valores de $h = 1$ cm comparativamente com os obtidos para $h = 3$ cm e $h = 5$ cm. O facto de as alturas das barras, para estas duas últimas situações, serem aproximadamente iguais justifica a proximidade verificada dos valores de θ_2 .

Assumindo um ângulo de repouso da areia de aproximadamente 35° , verifica-se que para θ_1 existe uma diferença de aproximadamente 46,5% e para θ_2 a diferença máxima atinge os 71%.

É importante realçar a existência de uma barra a montante da escavação, que é devida à ação do jato inicial, durante o ajuste do caudal. Verifica-se que a respetiva inclinação é semelhante à da escavação e da barra formadas a jusante.

Verifica-se ainda que a secção de profundidade máxima de erosão se localiza na direção da trajetória do jato. As representações gráficas relativas à espessura do colchão de água de 1 cm encontram-se no anexo E.

4.4.3. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI

Um dos objetivos deste estudo é avaliar a influência do ângulo de saída do trampolim nas dimensões da erosão provocada pela ação do jato. Para tal, foram realizados ensaios com ângulos de saída de 20° , 25° , 30° e 45° .

No decorrer dos ensaios experimentais realizados com $\alpha = 25^\circ$ verificou-se a ocorrência de afogamento do escoamento para o caudal de 0,51 L/s. Deste modo, optou-se por analisar apenas os resultados obtidos para os caudais de 0,71 L/s e 0,85 L/s. A observação das Figuras 4.15 e 4.16 permite realizar uma comparação desses resultados, com os obtidos para $\alpha = 20^\circ$.

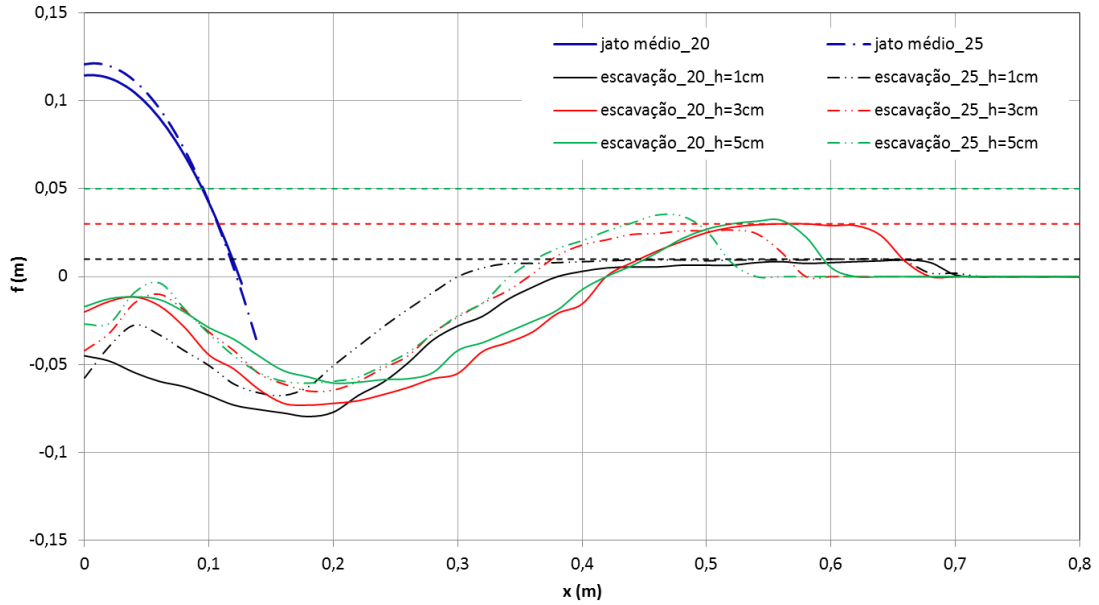


Figura 4.15- Comparação das trajetórias dos jatos e respectivos perfis de erosão para $Q = 0,71$ L/s.

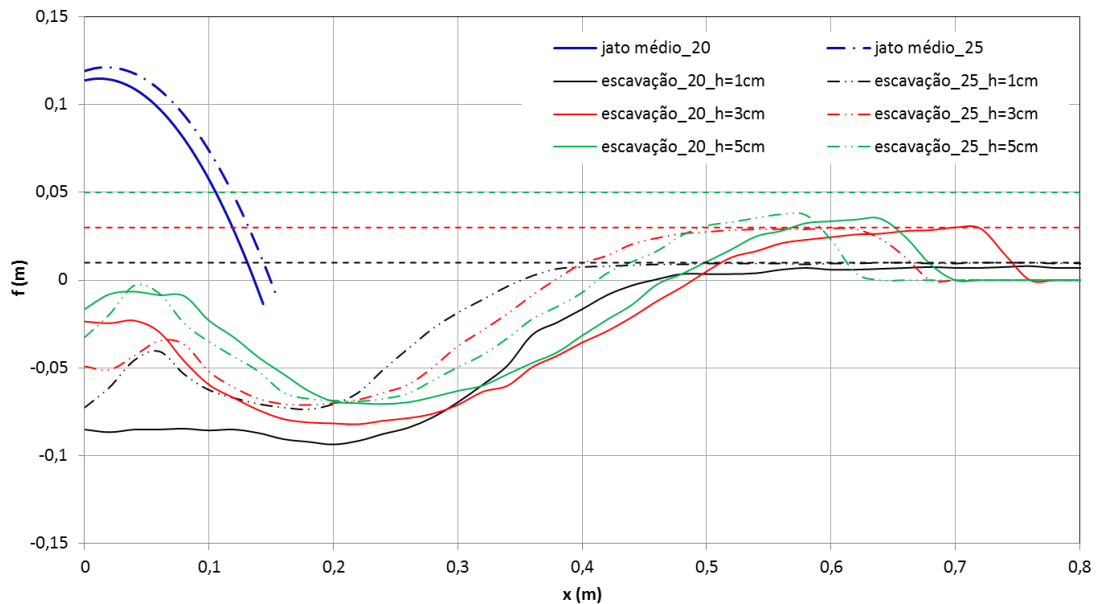


Figura 4.16- Comparação das trajetórias dos jatos e respectivos perfis de erosão para $Q = 0,85$ L/s.

Na situação representada na Figura 4.15, correspondente ao caudal de 0,71 L/s, verifica-se que a configuração da trajetória do jato de $\alpha = 25^\circ$ aproxima-se da trajetória do jato de $\alpha = 20^\circ$. Este fenómeno deve-se ao facto do caudal de 0,71 L/s, no caso de $\alpha = 25^\circ$, corresponder ao caudal de transição, isto é, ao caudal limite para que não ocorra afogamento do escoamento.

Na Figura 4.16 encontra-se uma representação gráfica relativa ao caudal de 0,85 L/s. Uma vez que, para $\alpha = 25^\circ$, o escoamento já adquire o tipo de comportamento representado na Figura 2.13, ou seja, desafogado, a configuração do jato é mais adequada.

Relativamente aos perfis de erosão obtidos, e representados igualmente nas Figuras 4.15 e 4.16, pode-se constatar que, de um modo geral, a erosão é mais significativa para $\alpha = 20^\circ$. De facto, o jato ao ser projetado segundo um ângulo superior, dá origem a uma maior dispersão no ar, dissipando uma parte da energia a ele associada. Note-se ainda que, a altura do trampolim em salto esqui aumenta com o aumento do ângulo de saída. Deste modo, a distância a percorrer, na vertical, é superior para $\alpha = 25^\circ$, possibilitando a ocorrência de uma maior dissipação de energia durante a projeção do jato no ar. Com efeito, o jato de $\alpha = 25^\circ$, comparativamente ao de $\alpha = 20^\circ$, possui uma menor energia no momento de impacto no leito, originando assim menores erosões

Também nos ensaios realizados para $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$ se verificou a ocorrência de afogamento do escoamento, para a gama de caudais utilizados nos ensaios com $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$. Com efeito, optou-se por realizar ensaios com $Q = 1,1$ L/s e $Q = 1,19$ L/s, para $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$, respetivamente, visto serem os valores limite para que o escoamento fosse desafogado (Figura 2.13).

Na representação gráfica da Figura 4.17 procede-se à comparação das trajetórias dos jatos provenientes dos trampolins em salto esqui com diferentes ângulos de saída e dos respetivos perfis de escavação, para o caudal de 0,71 L/s e $h = 5$ cm.

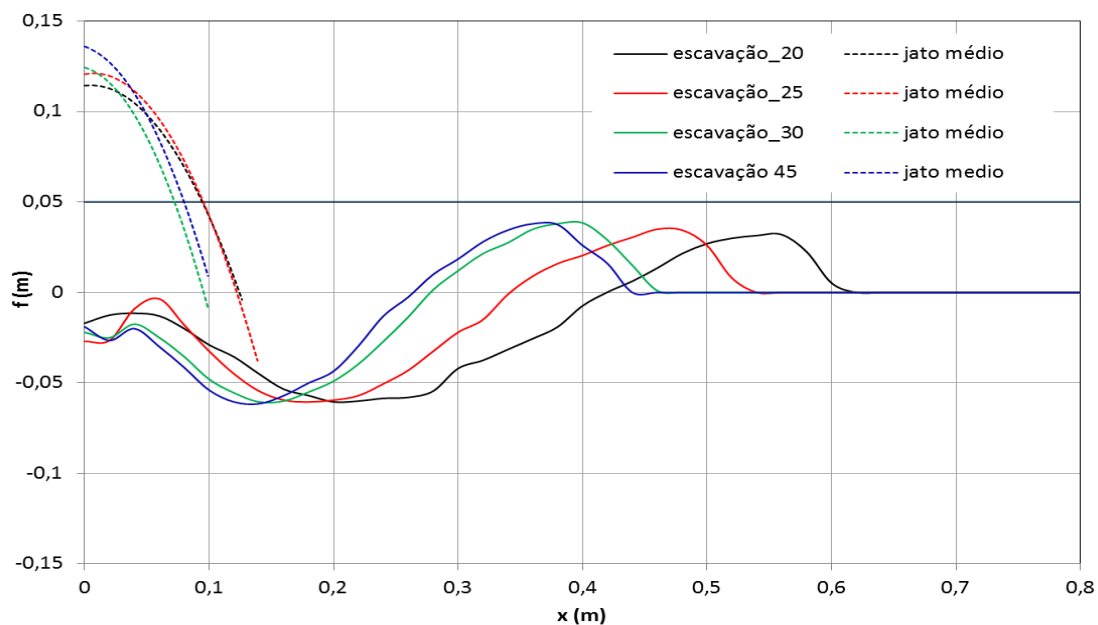


Figura 4.17- Representação gráfica das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para os diferentes ângulos de saída do trampolim.

Como referido anteriormente, para o caudal de 0,71 L/s, com $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$, o escoamento adquire um comportamento distinto. Grande parte da energia do escoamento dissipa-se no trampolim, devido à

presença de uma elevada turbulência do escoamento (Figura 4.18). Com a redução de energia do jato, surge a diminuição da velocidade e, conseqüentemente, verifica-se um decréscimo do alcance do jato, como se pode observar na Figura 4.17. Esta situação não é a mais desejável, pois o facto de a erosão ocorrer nas proximidades do descarregador, poderá colocar em causa a sua estabilidade.



Figura 4.18- Afogamento do escoamento antes do salto de esqui ($\alpha = 45^\circ$).

Realizou-se também uma análise comparativa entre os resultados obtidos para $\alpha = 30^\circ$ ($Q = 1,1$ L/s) e $\alpha = 45^\circ$ ($Q = 1,19$ L/s), apresentada na representação gráfica da Figura 4.19.

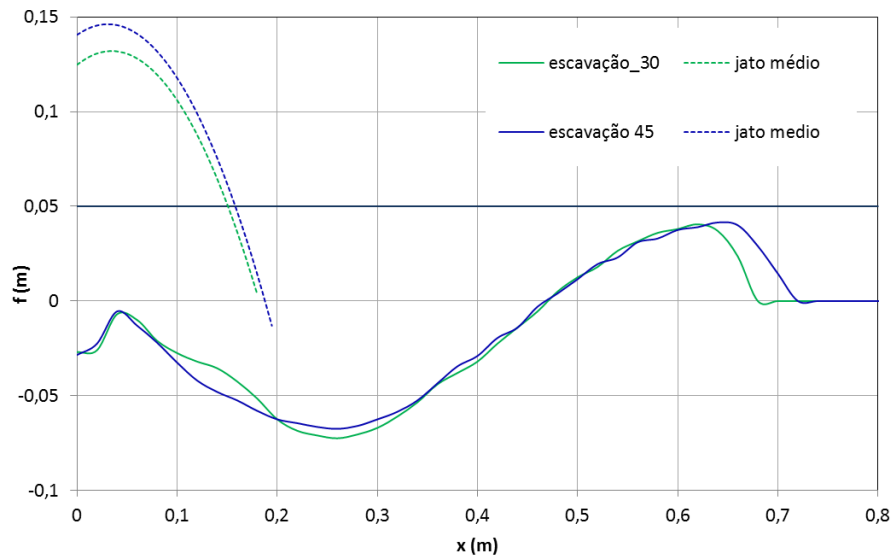


Figura 4.19- Comparação das trajetórias dos jatos e respetivos perfis de erosão para $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$.

Uma vez que os caudais estudados correspondem aos caudais de transição e estes, por sua vez, assumem valores distintos, não é possível realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos nas duas situações. No entanto, pode-se constatar que, para os casos em que o caudal escoado

corresponde ao caudal limite para que não ocorra afogamento, o valor do ângulo de saída do trampolim em salto esqui não tem grande influência no desenvolvimento da erosão. Como se pode visualizar na Figura 4.19, os perfis de erosão são praticamente coincidentes.

A utilização de uma gama de caudais superior (recorrendo a uma bacia de restituição com uma largura maior), permitiria a realização de uma análise mais detalhada.

4.5. PROFUNDIDADE MÁXIMA DA ESCAVAÇÃO

Após a realização dos ensaios experimentais e levantamento do perfil longitudinal das escavações verificadas, procedeu-se ao cálculo das profundidades máximas previstas através das expressões apresentadas no capítulo 2.

Nos quadros 4.4 a 4.7 apresenta-se, para cada um dos trampolins em estudo, um resumo dos valores medidos, para cada condição de escoamento, da profundidade máxima de escavação, f .

Quadro 4.4- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 20^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	H (m)	f_{medido} (m)
0,51	0,01	0,1089	0,07
	0,03	0,0906	0,0585
	0,05	0,0717	0,0440
0,71	0,01	0,1182	0,0795
	0,03	0,1001	0,0730
	0,05	0,0790	0,0605
0,85	0,01	0,1258	0,0935
	0,03	0,1051	0,0820
	0,05	0,0855	0,0705

Quadro 4.5- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 25^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	H (m)	f_{medido} (m)
0,71	0,01	0,1196	0,0675
	0,03	0,0977	0,0650
	0,05	0,0791	0,0605
0,85	0,01	0,1259	0,0735
	0,03	0,1105	0,0710
	0,05	0,0867	0,0690

Quadro 4.6- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 30^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	H (m)	f_{medido} (m)
0,71	0,05	0,0732	0,0605
1,10	0,05	0,0983	0,0725

Quadro 4.7- Profundidades máximas de escavação para $\alpha = 45^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	H (m)	f_{medido} (m)
0,71	0,05	0,08527	0,0615
1,19	0,05	0,11568	0,0675

A relação entre os valores da profundidade máxima de escavação, f , e a altura de queda, H , é dada pela representação gráfica da Figura 4.20. Como se pode constatar, para cada caudal estudado e para cada modelo de trampolim utilizado, a profundidade da escavação aumenta com o aumento da altura de queda, logo, com o decréscimo da espessura do colchão de água.

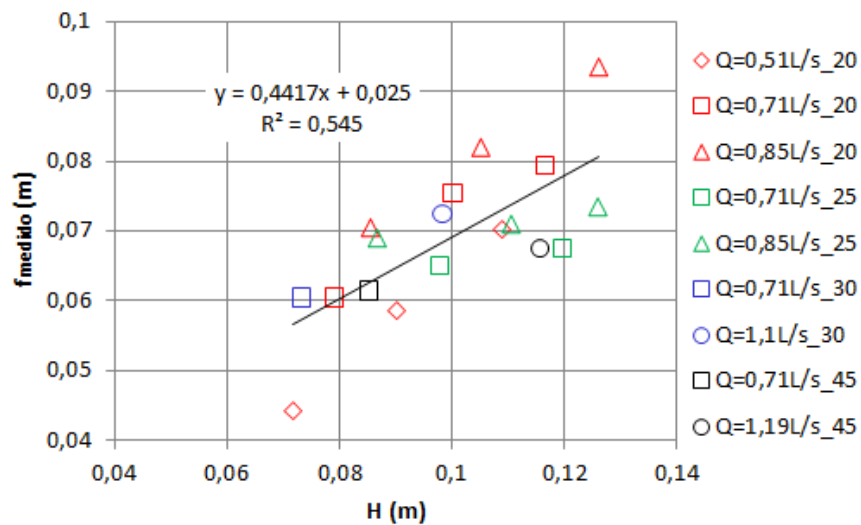


Figura 4.20- Representação gráfica dos valores da profundidade máxima de escavação, f , obtidos experimentalmente e relação empírica entre os valores de f e H .

O ajuste de uma reta aos pontos relativos às medições realizadas (Figura 4.20), permite obter uma relação empírica entre os parâmetros f e H , independentemente do caudal e do ângulo de saída do trampolim. Apesar do baixo coeficiente de correlação, a equação da reta obtida permite realizar uma primeira estimativa da profundidade máxima da escavação.

Pode observar-se a existência de uma maior disparidade, nas extremidades, entre as medições e o ajuste. Essas medições estão associadas aos ensaios realizados com a espessura do colchão de água de 1cm, nomeadamente para $\alpha = 20^\circ$ e $Q = 0,85$ L/s e para $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $Q = 0,85$ L/s e com

$h = 5$ cm para $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,51$ L/s. Verifica-se, no entanto, que se não se considerar estas medições para a realização do ajuste o coeficiente de correlação obtido é inferior.

4.5.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS OBTIDOS PELA APLICAÇÃO DAS EXPRESSÕES

Para se proceder à aplicação das expressões empíricas e semiempíricas propostas pelos diferentes autores, tornou-se necessário determinar os valores correspondentes no protótipo das variáveis alvo de estudo no modelo. No anexo F encontram-se os quadros com os valores dos diferentes caudais estudados, das alturas de queda, das dimensões características do material granular e do raio dos diferentes modelos de trampolim utilizados.

Note-se que, a aplicação de algumas expressões exige o conhecimento de parâmetros específicos, que podem ser determinados em função das variáveis mencionadas anteriormente.

Nos quadros 4.8 a 4.11 apresentam-se, para todos os ensaios realizados com $\alpha = 20^\circ$, os valores (em modelo) das profundidades máximas previstas pelos diversos autores. Estes valores são comparados com os valores medidos experimentalmente através de representações gráficas. Nas Figuras 4.21 a 4.23 representam-se, para o caudal de 0,71 L/s, as profundidades máximas. Os restantes gráficos são apresentados no anexo F. A análise foi realizada tendo por base as condições de aplicabilidade de cada expressão, que poderá justificar a proximidade dos resultados, ou a sua discrepância. Optou-se por fazer essa análise por grupo de autores, com o intuito de facilitar a compreensão da mesma.

No quadro 4.8 e na Figura 4.21 estão apresentados os resultados obtidos para o grupo I. Na Figura 4.21 é de assinalar a grande dispersão de resultados.

Tal como constatado por Martins (1973), as expressões de Franke (1960), Eggenberger (1944) e Hartung (1959) conduzem a valores bastantes elevados. Verifica-se que o mesmo ocorre para as previsões de Bisaz & Tschopp (1972) e Chee & Kung (1974).

Segundo Mason e Arumugam (1985), as constantes x , y e z (quadro 2.3) são influenciadas pelos efeitos de escala existentes na extrapolação dos resultados do modelo para o protótipo, devido à consideração apenas da semelhança de Froude. O autor afirma ainda que tal se verificou, no seu estudo, nas expressões de Chee & Padivar (1969), Schoklitsch (1935), Veronese (A) (1937), Veronese (B) (1937), Damle (A) (1966) e Taraimovich (1978). O mesmo se constatou no presente estudo para as mesmas expressões, acrescentando a de Patrashev (1937), uma vez que os resultados de f obtidos pela aplicação das expressões com os valores em modelo e em protótipo apresentam variações.

Como se pode observar na Figura 4.21, a existência de efeitos de escala, na maioria das expressões, resulta em previsões diferentes do medido experimentalmente. Contudo, verifica-se uma elevada proximidade dos valores obtidos pela aplicação da expressão de Schoklitsch (1935) com os medidos, à exceção do obtido para $h = 5$ cm, e por outro lado, das expressões de Damle (A) (1966) e Taraimovich (1978) para os resultados obtidos com $h = 5$ cm.

A aplicação das expressões de Sofrelec (1985), Incyth (1985), Martins (B) (1984), Machado (1980) e Patrashev (1937) resulta numa previsão dos valores da profundidade máxima de escavação acima do medido experimentalmente, apresentando assim valores pelo lado da segurança. Note-se que os três primeiros autores consideram que a dimensão da partícula não tem influência no desenvolvimento da erosão, enquanto os dois últimos autores afirmam que d_{90} é suficiente para representar o material do leito.

Quadro 4.8- Profundidades máximas obtidas- Grupo I (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)	6,93	6,71	6,37	8,49	8,22	7,81	9,54	9,20	8,82
Patrashev (1937)	7,69	7,38	6,93	9,24	8,88	8,34	10,30	9,84	9,34
Veronese (A) (1937)	3,51	3,39	3,20	4,27	4,26	3,89	4,78	4,59	4,38
Veronese (B) (1937)	11,08	10,69	10,09	13,46	12,99	12,27	15,09	14,47	13,81
Eggenburger (1944)	37,73	34,61	30,62	47,63	44,10	39,01	55,11	50,31	45,35
Hartung (1959)	24,94	23,48	21,46	31,29	29,59	27,06	35,88	33,59	31,17
Franke (1960)	41,05	37,69	33,32	53,06	49,11	43,42	62,15	56,74	51,14
Damle (A) (1966)	5,49	5,03	4,45	6,70	6,20	5,49	7,61	6,95	6,27
Bisaz e Tschopp (1972)	15,80	15,15	14,21	19,03	18,29	17,16	21,24	20,28	19,23
Chian Min Wu (1973)	6,79	6,53	6,15	8,17	7,87	7,42	9,11	8,73	8,31
Chee & Kung (1974)	13,67	13,25	12,58	16,91	16,39	15,56	19,12	18,42	17,67
Chee & Padivar (1969)	16,78	16,34	15,57	21,22	20,62	19,67	24,26	23,46	22,59
Martins (B) (1984)	7,71	7,61	7,39	9,47	9,32	9,06	10,63	10,42	10,21
Taraimovich (1978)	4,34	4,17	3,91	5,51	5,30	4,97	6,33	6,05	5,74
Machado (1980)	10,22	9,70	8,97	12,33	11,74	10,86	13,81	13,04	12,22
SOFRELEC (1985)	11,82	11,67	11,34	14,52	14,29	13,90	16,30	15,98	15,65
INCYTH (1985)	8,23	7,90	7,41	9,88	9,50	8,93	11,02	10,52	9,99

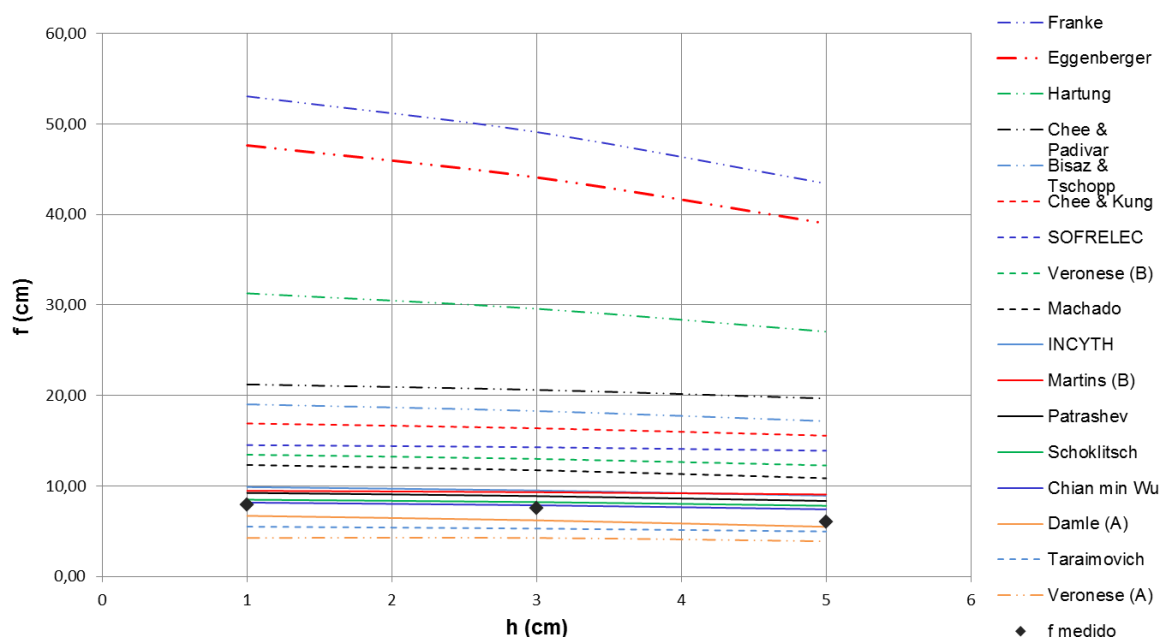


Figura 4.21- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q = 0,71$ L/s).

A expressão de Chian Min Wu (1973) apresenta resultados muito semelhantes à de Schoklitsch (1935). Deste modo, pode-se afirmar que, no grupo I, estas duas expressões são as que traduzem resultados mais viáveis para a previsão da profundidade da escavação.

Relativamente aos resultados obtidos no grupo II, representados no quadro 4.9 e na Figura 4.22, verifica-se a existência de uma diferença significativa entre as várias expressões.

Quadro 4.9- Profundidades máximas obtidas- Grupo II (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
Jaeger (1939)	6,54	7,44	6,61	8,06	9,56	8,98	9,10	10,90	10,64
Martins (A) (1984)	2,51	3,46	3,95	2,80	3,81	4,41	2,98	4,01	4,69
Rubinstein (1963)	22,94	17,80	16,72	34,69	26,41	24,59	43,76	32,93	30,69
Mason & Arumugam (1985)	6,54	6,00	4,70	8,13	7,83	6,72	9,09	9,00	8,05
Ghodsian(A) (1999)	0,10	-2,32	-4,48	0,34	-2,18	-4,37	0,50	-2,09	-4,30
Heng et al. (2013)	12,00	14,16	12,88	8,43	13,23	12,38	5,64	12,48	11,96
Bombardelli & Gioia (2006)	14,58	13,35	10,00	19,37	18,67	14,87	23,18	22,24	18,72

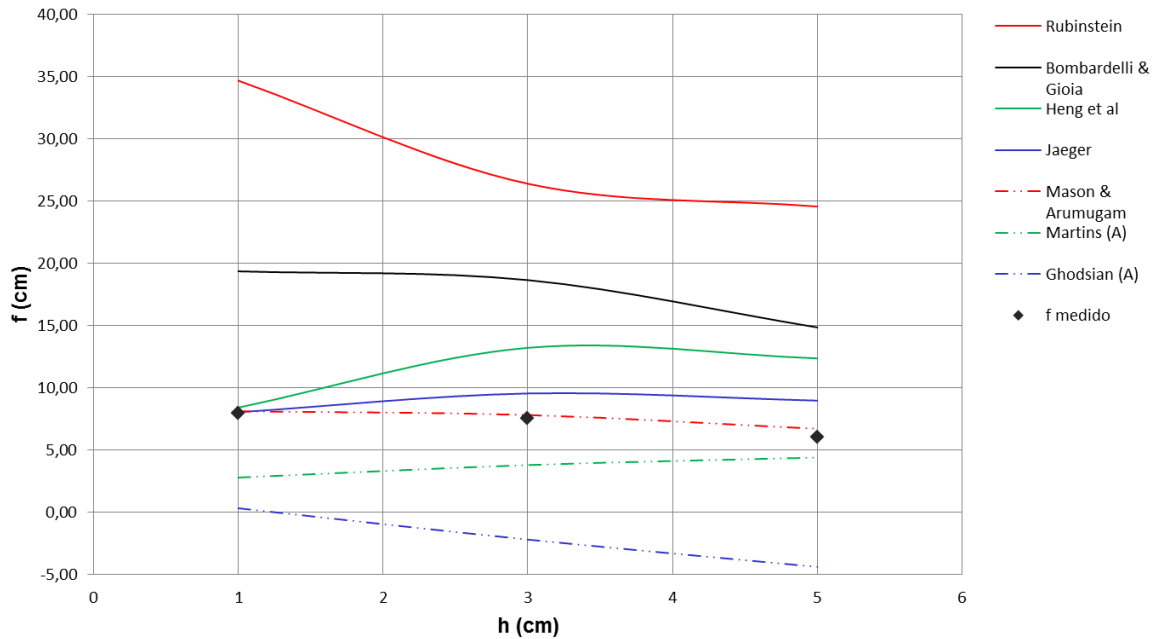


Figura 4.22- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q = 0,71$ L/s).

As expressões de Rubinstein (1963) e Bombardelli & Gioia (2006), tal como acontece em algumas expressões do grupo I, refletem-se em valores de f exagerados.

As profundidades máximas obtidas pela aplicação das expressões de Jaeger (1939), Heng et al. (2013) e Martins (A) (1984) são incoerentes, devido à tendência crescente das curvas com o aumento da espessura do colchão de água, o que não se verificou na realidade. No entanto, para $h = 1$ cm, e tendo em consideração as expressões dos dois primeiros autores, verifica-se uma aproximação dos valores previstos e dos medidos. É de notar que, no caso de Heng et al. (2013), a expressão foi desenvolvida para alturas de colchão de água superiores a 0,179 m e, no caso de Martins (A) (1984), o estudo foi desenvolvido com material do leito constituído por blocos paralelepípedicos de dimensões elevadas, situações bem distintas da atual.

O recurso à expressão de Ghodsian (A) (1999) não se mostra viável, porque origina valores negativos. À semelhança de Martins (A) (1984), o estudo levado a cabo por Ghodsian (A) (1999) foi realizado com sedimentos de dimensões muito superiores, não aplicável, portanto, ao presente estudo.

Por último, a curva obtida com recurso à expressão de Mason & Arumugam (1985) descreve adequadamente a tendência de evolução da erosão, para um caudal específico e diferentes espessuras do colchão de água.

Os dados relativos ao grupo III são apresentados no quadro 4.10 e na Figura 4.23.

Quadro 4.10- Profundidades máximas obtidas- Grupo III (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
Mikhalev (1960)	39,10	18,40	9,31	54,10	26,28	14,82	63,53	31,44	18,74
Mirskhulava (A) (1967b)	17,41	15,60	12,86	24,15	21,93	18,77	28,30	25,98	22,79
Mirskhulava (B) (1967b)	4,16	3,01	1,48	7,57	6,48	4,5	10,21	8,54	6,69
Yildiz & Uzucek (A) (1994)	8,51	6,09	3,12	10,08	7,51	4,35	10,73	8,12	4,97
Yildiz & Uzucek (B) (1996)	1,99	-0,11	-2,28	2,63	0,51	-1,69	3,07	0,91	-1,27
Azmathullah et al. (2004)	4,30	-0,10	-2,87	6,42	1,02	-2,03	7,94	1,83	-1,41
Naini (2011)	9,61	5,19	2,05	12,52	7,39	3,96	14,49	8,87	5,31
Ghodsian (B) (2012)	219,82	157,08	130,16	223,92	160,93	133,43	227,72	163,04	135,98

Devido à diferença significativa existente nas condições de estudo, a expressão proposta por Ghodsian (B) (2012), Mikhalev (1960) e Mirskhulava (A) (1967) são exagerados, principalmente para a espessura de colchão de água inferior.

Por outro lado, as expressões de Yildiz & Uzucek (B) (1996) e Azmathullah et al. (2004) apresentam resultados por defeito, chegando mesmo a assumir valores negativos para as espessuras de colchão de água superiores.

As curvas definidas com recurso às expressões propostas por Mirskhulava (B) (1967b), Yildiz & Uzucek (A) (1994) e Naini (2011) são semelhantes e traduzem uma aproximação satisfatória das profundidades máximas obtidas experimentalmente.

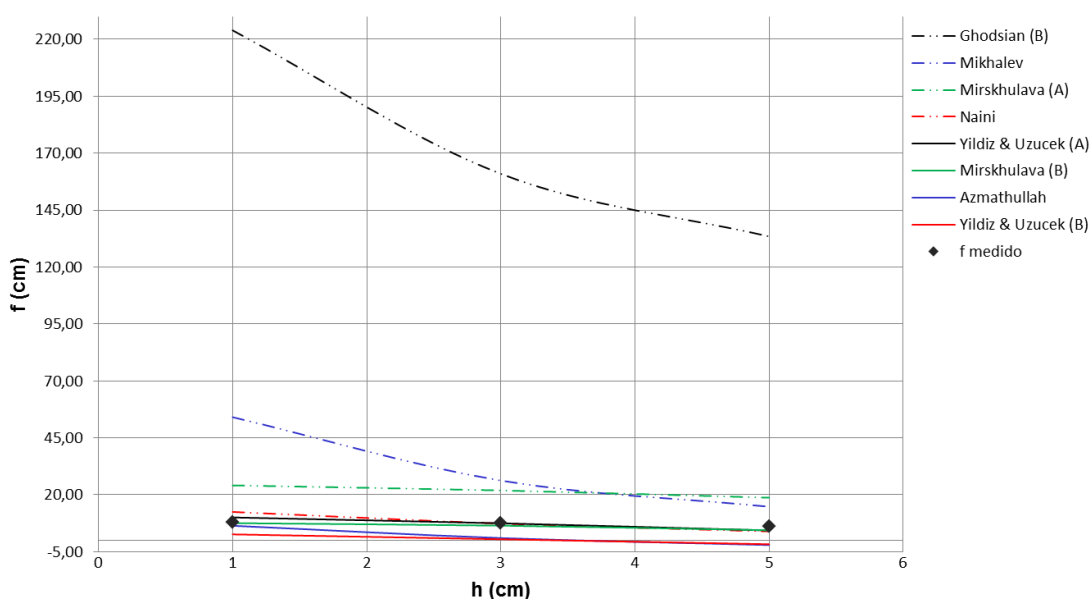


Figura 4.23- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III (Q = 0,71 L/s).

Por último, apresentam-se os valores obtidos para os grupos IV e V no quadro 4.11 e na representação gráfica da Figura 4.24.

Quadro 4.11- Profundidades máximas obtidas- Grupo IV e V (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
Mason (B) (1989)	1,39	1,65	1,78	1,69	2,01	2,16	1,89	2,24	2,42
Hoffmans (1998)	9,52	7,04	4,17	11,36	8,79	5,75	12,40	9,72	6,71
Zhang et al. (2014)	22,71	20,17	17,34	23,72	21,51	18,46	24,92	22,19	19,43
Doddiah & Thomas (1953)	25,66	9,85	5,08	41,30	14,68	7,27	54,43	18,38	9,23

Pela observação da Figura 4.24 verifica-se que as expressões apresentadas nos grupos IV e V não permitem, no presente estudo, a realização de uma previsão plausível da profundidade máxima de escavação.

É de notar que, no caso de Mason (B) (1989), é considerada a emulsão de ar no jato, através da injeção de ar, fator que não foi alvo de análise no presente estudo.

A diferença registada na expressão de Zhang et al. (2014) pode estar relacionada com o parâmetro adotado para a caracterização da resistência à erosão do material do leito. Se esse valor fosse ajustado a este estudo, a curva obtida conduziria a valores inferiores.

De todas as expressões do grupo IV, a proposta por Hoffmans (1998) é a que oferece resultados mais próximos dos medidos experimentalmente. O facto de apresentar valores ligeiramente superiores, reflete-se numa aproximação pelo lado da segurança.

Relativamente à expressão de Doddiah et al. (1953), verifica-se que a curva se vai aproximando dos valores medidos com o aumento da espessura do colchão de água. Apresentando, no entanto, valores exagerados para $h = 1$ cm.

As condições de aplicabilidade de cada expressão são um fator fulcral na compreensão e análise dos resultados. Nos quadros 2.4 e 2.5 encontram-se os limites de aplicação para algumas expressões. O facto de não se conhecer as condições dos estudos levados a cabo por todos os autores listados reflete-se na existência de um grau de incerteza relativamente à validade dos resultados obtidos pela aplicação das expressões.

De uma forma generalizada, verifica-se, pela observação das Figuras 4.21 a 4.24 e dos quadros 4.8 a 4.11, que as expressões propostas por Mason & Arumugam (1985), Chian Min Wu (1973) e Yildiz & Uzupek (A) (1994) são as que melhor traduzem a evolução da profundidade máxima de escavação.

Com o intuito de analisar com mais detalhe as expressões mencionadas anteriormente, procedeu-se à representação dos valores de f , experimentais e teóricos, em função do caudal escoado.

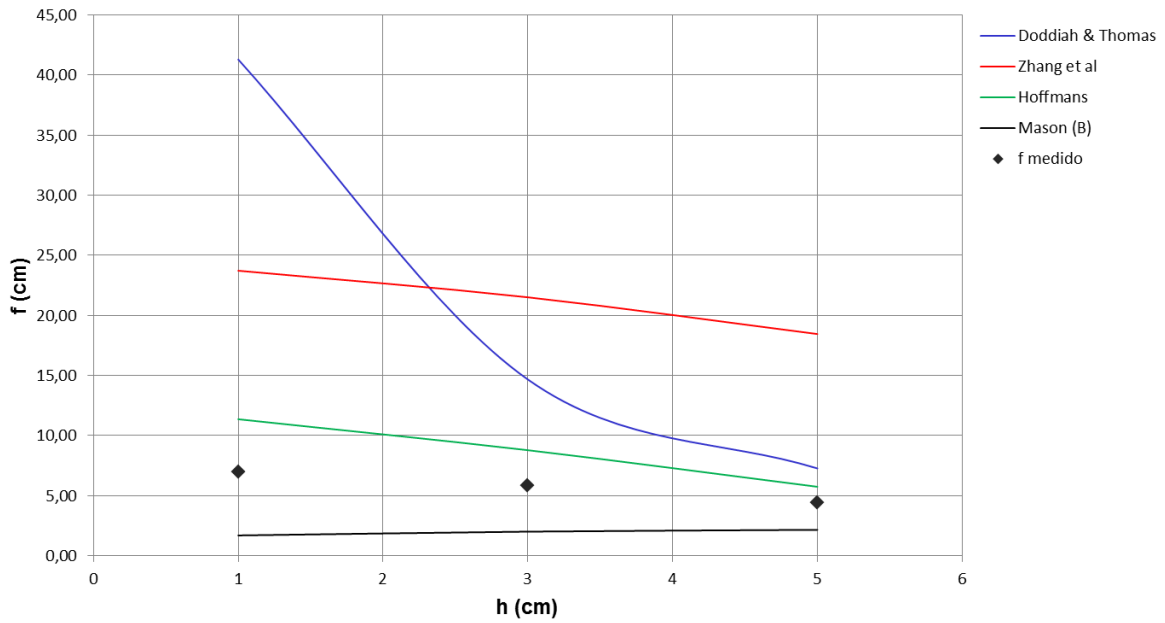


Figura 4.24- Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e grupo V ($Q = 0,71$ L/s).

Na Figura 4.25 encontram-se representados os valores relativos à expressão de Mason & Arumugam (1985), do grupo II, para $\alpha = 20^\circ$.

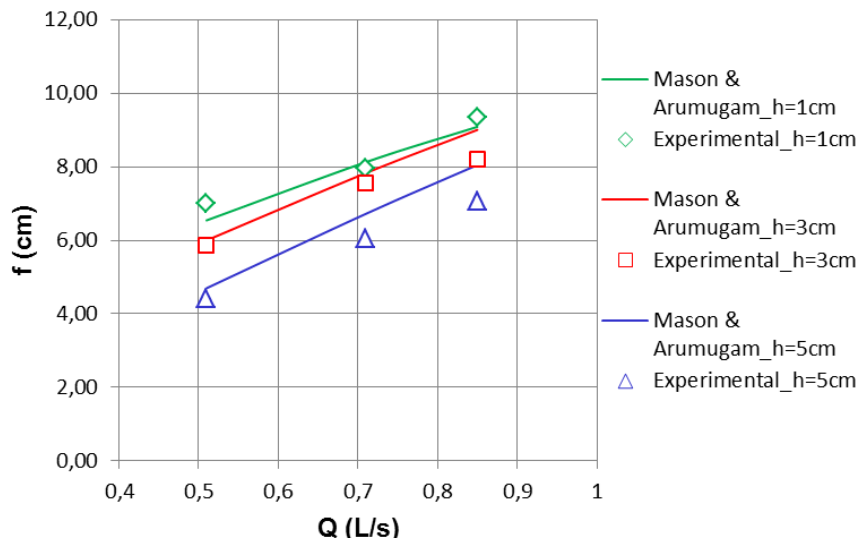


Figura 4.25- Representação das profundidades máximas experimentais e das previstas pela aplicação da expressão de Mason & Arumugam (1985), em função do caudal escoado.

A observação da Figura 4.25 permite afirmar que as curvas obtidas pela expressão (2.21) apresentam uma tendência crescente da profundidade de escavação com o aumento do caudal. Verifica-se que a pendente da curva verde, associada a $h = 1$ cm, vai diminuindo com o aumento do caudal, aproximando-se da curva vermelha, associada a $h = 3$ cm. Comparando os valores da altura de queda, H , verifica-se que existe uma maior proximidade entre os valores de $h = 1$ cm e $h = 3$ cm, razão pela

qual existe uma aproximação das respectivas curvas. Contrariamente, as curvas relativas a $h = 3$ cm e $h = 5$ cm são praticamente paralelas.

As diferenças registadas entre as curvas e os valores obtidos experimentalmente não são muito significativas, representando de forma satisfatória a evolução da profundidade de erosão.

Realizando um ajuste aos dados experimentais (Figura 4.26), verifica-se que as curvas obtidas são igualmente paralelas.

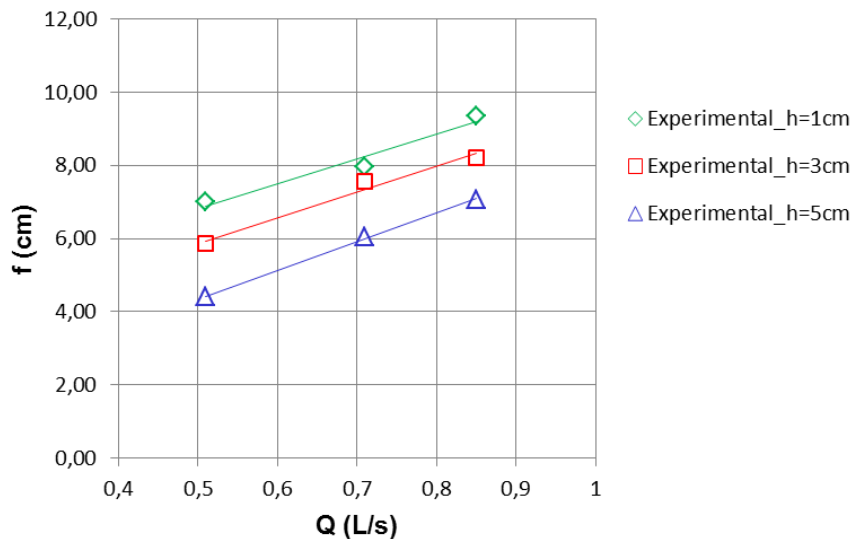


Figura 4.26- Ajuste das curvas aos dados experimentais.

Na representação gráfica da Figura 4.27, correspondente à aplicação da expressão de Chian Min Wu (1973), grupo I, verifica-se que, com o acréscimo dos caudais escoados, as curvas apresentam uma tendência de evolução semelhante. A proximidade das diferentes curvas poderá estar relacionada com o facto de os valores da altura de queda serem muito próximos nas três condições de escoamento estudadas, originando assim previsões da escavação de erosão muito parecidas e superiores ao medido experimentalmente. Para a espessura do colchão de água de 5 cm pode-se afirmar que esta expressão não traduz, de modo satisfatório, os resultados experimentais obtidos.

A Figura 4.28 está relacionada com os valores obtidos pela expressão de Yildiz & Uzucek (A) (1994), grupo III.

Das três expressões, esta é a que apresenta resultados mais díspares dos obtidos experimentalmente. À semelhança das expressões de Mason & Arumugam (1985) e Chian Min Wu (1973), as diferenças verificadas estão relacionadas com os valores da altura de queda. Apesar de Yildiz & Uzucek (1994) assumirem que a profundidade da escavação depende do valor do ângulo de incidência do jato, não se verificou que as variações desta variável nas diferentes condições interferissem de forma significativa nos resultados obtidos pela expressão.

No entanto, verifica-se que as curvas apresentadas na Figura 4.28 se desenvolvem paralelamente à nuvem de pontos correspondente aos valores de f medidos, para cada condição. Note-se ainda que, para a espessura do colchão de água de 3 cm, a expressão de Yildiz e Uzucek (1994) é a que melhor traduz a evolução da profundidade da erosão.

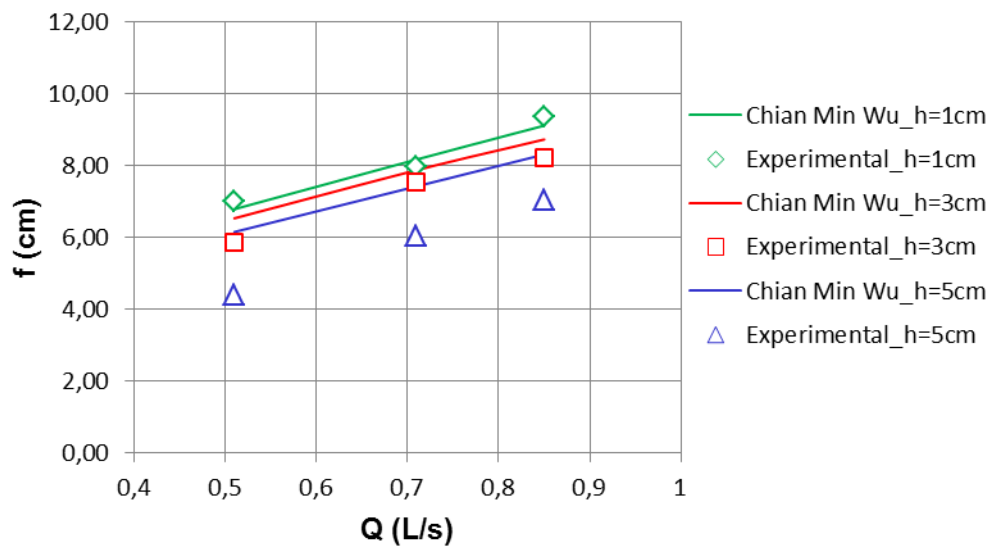


Figura 4.27- Representação das profundidades máximas experimentais e das previstas pela aplicação da expressão de Chian Min Wu (1973), em função do caudal escoado.

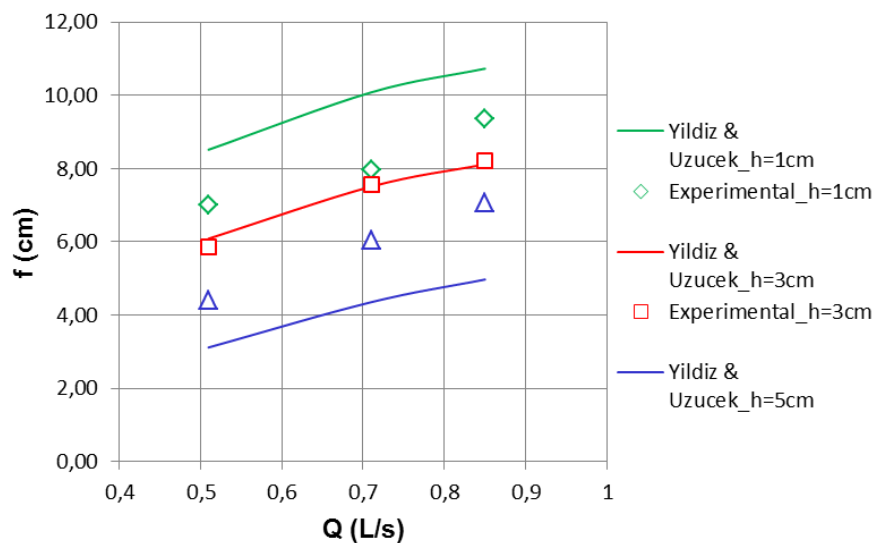


Figura 4.28- Representação das profundidades máximas experimentais e das previstas pela aplicação da expressão de Yildiz & Uzupek (A) (1994), em função do caudal escoado.

4.5.2. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA APLICAÇÃO DAS EXPRESSÕES COM OS OBTIDOS POR FIGUEIREDO (2010)

Paralelamente à análise realizada, procedeu-se à comparação dos valores da profundidade máxima de erosão prevista pela aplicação das diversas expressões inúmeras no presente estudo e dos valores apresentados por Figueiredo (2010), obtidos pela aplicação das mesmas expressões. Para o efeito, apresentam-se nas Figuras 4.29 a 4.32 as representações gráficas com a comparação dos referidos valores, para cada grupo de autores.

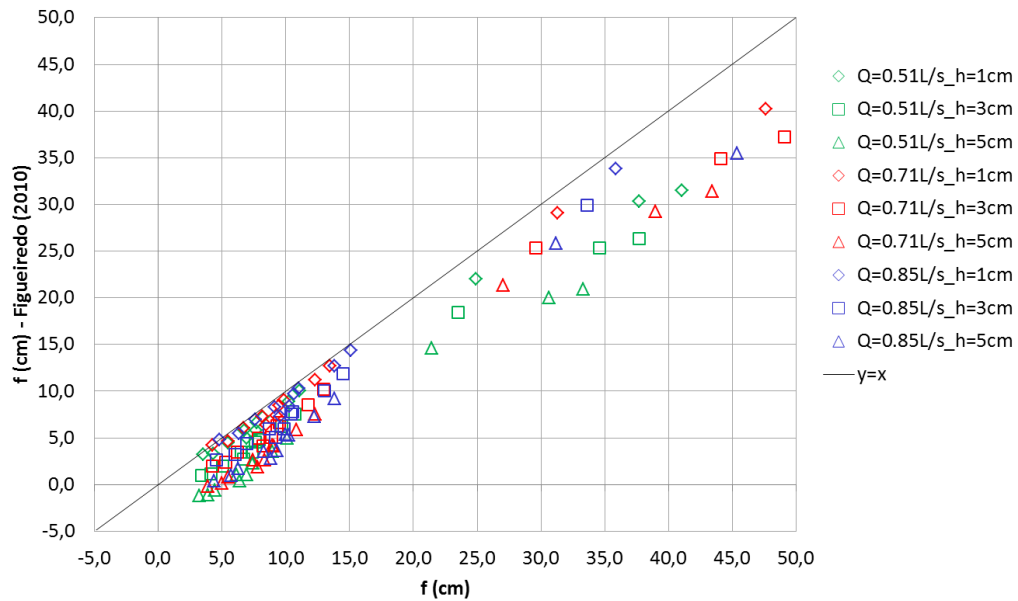


Figura 4.29- Comparação entre os valores de f obtidos no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010) - grupo I.

A dispersão de pontos visível na Figura 4.29 está associada às expressões de Franke (1960), Hartung (1959) e Eggenberger (1944) que, como constatado anteriormente, dão origem a valores de f exagerados. A diferença de resultados obtidos nos dois estudos é justificada pelos diferentes valores das dimensões características do material do fundo e das alturas de queda. No presente estudo, estas variáveis assumem valores inferiores e são, deste modo, responsáveis pela obtenção de valores superiores aos de Figueiredo (2010).

As restantes expressões do grupo I, associadas à concentração de pontos existente para valores de $f < 15$ cm, traduzem-se em resultados mais coerentes. No entanto, verifica-se que os valores obtidos no presente estudo são superiores. Numa primeira análise, poder-se-ia afirmar que os valores de f e H estão na base dessas diferenças. Contudo, constatou-se que a diferença existente está relacionada com as espessuras do colchão de água. Como referido em 2.3.4.1, os autores do grupo I não consideram a influência do colchão de água na determinação da erosão. Deste modo assumiu-se que os valores obtidos pela expressão (2.9) refletiam o valor da profundidade da escavação relativamente à posição inicial do leito, não sendo necessário subtrair o valor de h . Por outro lado, Figueiredo (2010) considerou que o valor obtido através da expressão (2.9) era em função da espessura do colchão de água, razão pela qual apresenta valores inferiores aos do presente estudo. Apresenta-se na Figura 4.30 a representação gráfica, caso fosse considerada a espessura do colchão de água.

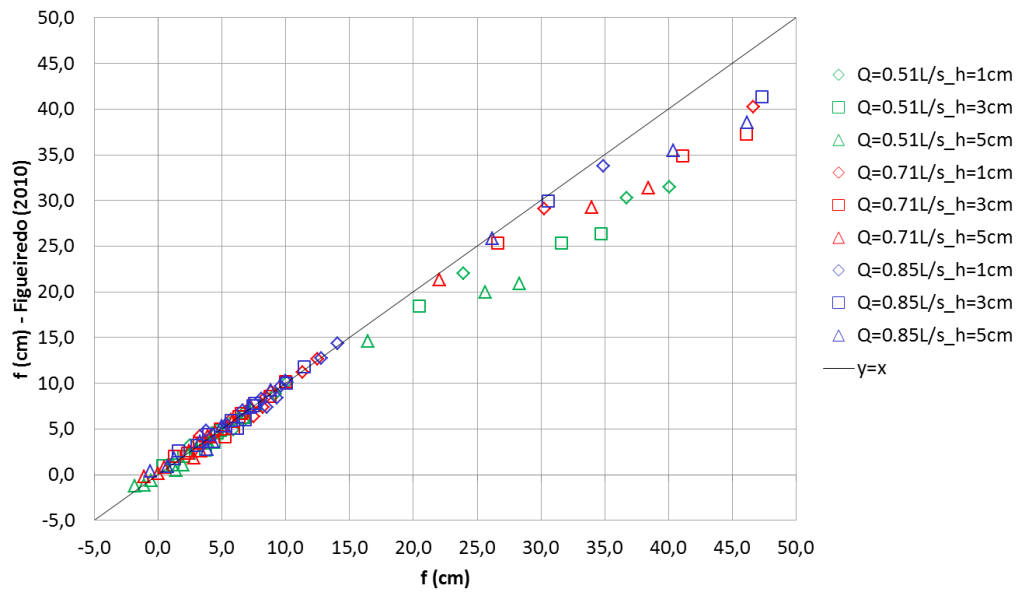


Figura 4.30- Comparação entre os valores de f obtidos pelas expressões do grupo I no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010).

No grupo II, cujos valores estão representados na Figura 4.31 verifica-se, em geral, uma proximidade entre os resultados obtidos nos dois estudos. As únicas expressões em que se verifica uma maior discrepância são as propostas por Martins (A) (1984) e Rubinstein (1963).

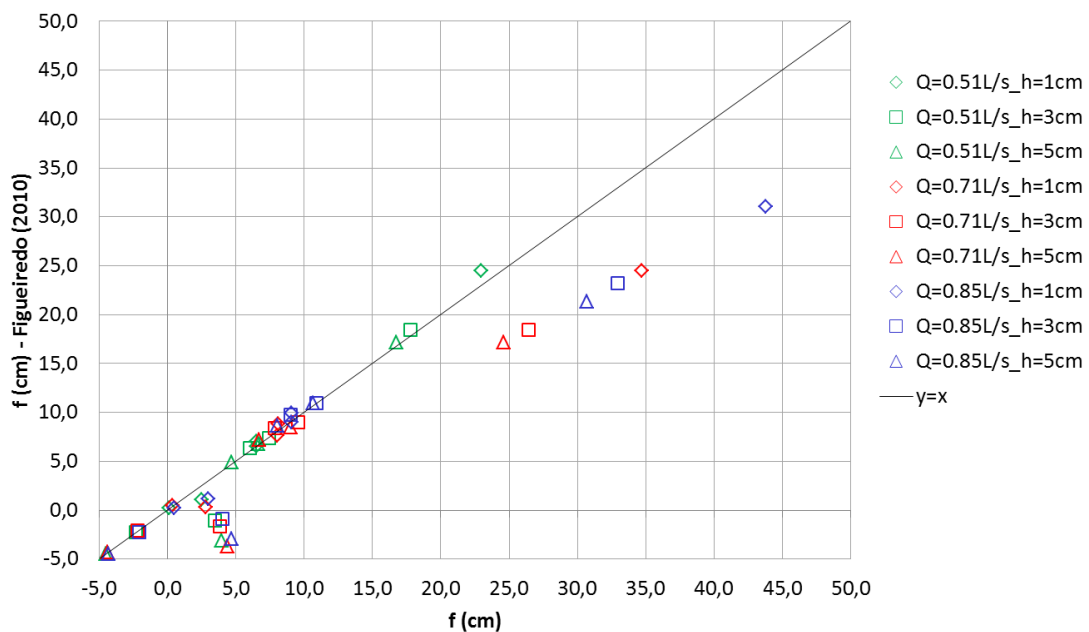


Figura 4.31- Comparação entre os valores de f obtidos pelas expressões do grupo II no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010).

Como referido anteriormente, o facto de a areia utilizada apresentar dimensões características inferiores e alturas de queda ligeiramente menores, reflete-se, na sua generalidade, em previsões mais elevadas

para a profundidade de escavação. Deste modo, para uma dada condição de escoamento, verifica-se que o parâmetro N , necessário para a aplicação da expressão de Martins (A) (1984), assume valores superiores, originando, conseqüentemente, valores de f mais elevados. Ao contrário do sucedido no estudo de Figueiredo (2010), não se verificou a existência de valores de f negativos.

Relativamente à expressão de Rubinstein (1963), pode afirmar-se que, para o caudal de 0,51 L/s, os resultados são semelhantes. No entanto, com o aumento do caudal verifica-se que a diferença entre os valores da profundidade máxima é mais acentuada. O facto de Figueiredo (2010) apresentar valores de H maiores, para a mesma condição de escoamento, resulta em valores teóricos menores. A esse fator acresce a diferença existente dos valores de d_{90} nos dois estudos.

A representação gráfica da Figura 4.32 está relacionada com os valores obtidos através das expressões do grupo III. Dos três grupos de autores, este é o que apresenta uma maior dispersão entre os resultados do presente estudo e de Figueiredo (2010).

Os valores obtidos pelas expressões de Mikhalev (1960) e Mirskhulava (A) (1967b) são influenciados pelos valores de α' , d_{90} e H . Verifica-se que, para o caudal de 0,51 L/s existe uma menor discrepância entre os resultados obtidos para as diferentes espessuras do colchão de água. Tal se deve ao facto de, para essa condição de escoamento, os valores de α'_{medido} serem semelhantes nos dois estudos. Para $Q = 0,71$ L/s e $Q = 0,85$ L/s os valores de α'_{medido} são superiores aos apresentados por Figueiredo (2010). Juntamente com as diferenças existentes dos valores de d_{90} e H , é expectável que os valores obtidos no presente estudo sejam superiores.

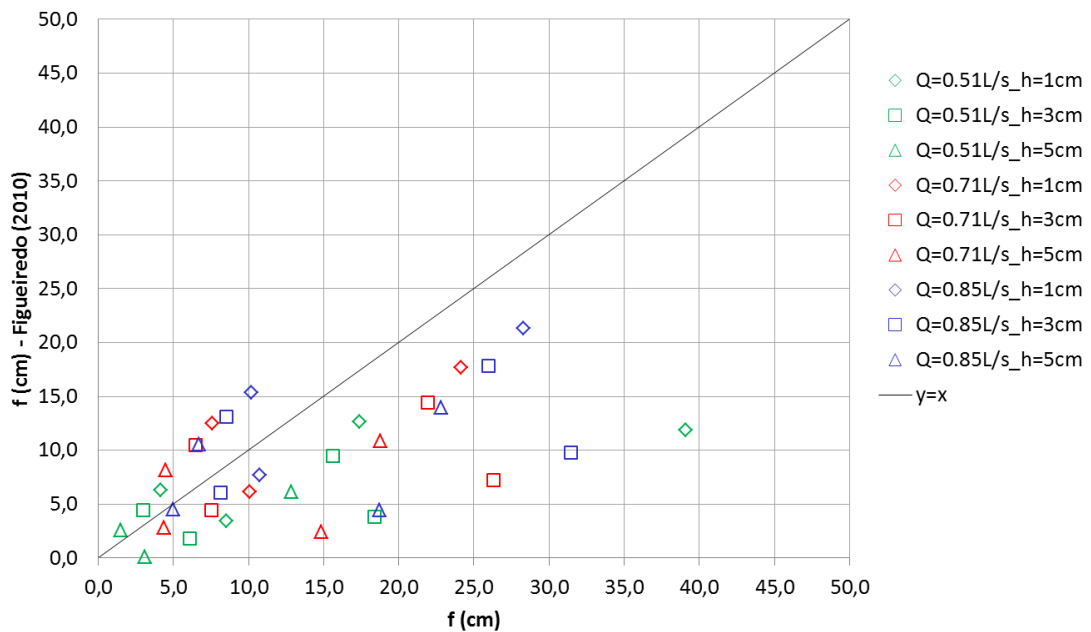


Figura 4.32- Comparação entre os valores de f obtidos no presente estudo e os obtidos por Figueiredo (2010) – grupo III.

Contrariamente, verifica-se que na expressão de Mirskhulava (B) (1967b) os valores de f são superiores do estudo de Figueiredo (2010). A justificação poderá ser baseada nos valores de α' , U_0 e H determinados, uma vez que, para valores superiores dessas variáveis, os parâmetros W , b_0 e U são também superiores, resultando em previsões de f maiores.

Por último, a diferença verificada nos valores da expressão de Yildiz & Uzucek (A) (1994) poderão estar relacionados com o facto de as expressões apresentarem uma desigualdade na sua configuração. Figueiredo (2010) apresenta uma expressão que faz depender o valor de f de $\cos\alpha'$. No entanto, a expressão encontrada na pesquisa bibliográfica realizada no âmbito deste estudo, assume que a profundidade máxima depende do valor de $\sin\alpha'$.

4.5.3. INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE SAÍDA DO TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI

Na presente secção procede-se à análise da influência de α no cálculo das profundidades máximas obtidas com recurso às expressões já inumeradas.

Os valores de f , para os ângulos de saída do trampolim de 25°, 30° e 45°, encontram-se organizados em quadros no anexo F.

Com efeito, procedeu-se à comparação dos valores teóricos obtidos para os diferentes ângulos de saída e dos valores medidos experimentalmente, para as expressões de Mason & Arumugam (1985) (Figura 4.33), Chian Min Wu (1973) (Figura 4.34), Yildiz & Uzucek (A) (1994) (Figura 4.35) e Damle (A) (1966) (Figura 4.36).

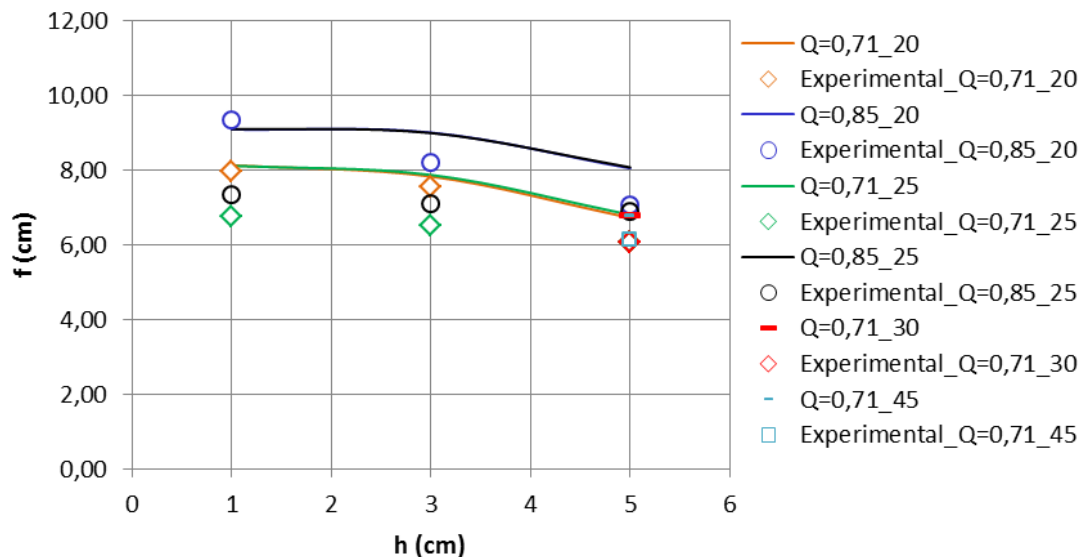


Figura 4.33- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Mason & Arumugam (1985), para os diferentes valores de α .

Como se pode observar na Figura 4.33, os valores teóricos obtidos para os diferentes ângulos de saída do trampolim são bastante semelhantes. No entanto, as profundidades máximas obtidas experimentalmente são inferiores para os valores de 25°, 30° e 45°, afastando-se, deste modo, dos valores previstos. Para os casos de $\alpha = 30^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$ era de esperar a discrepância entre os resultados obtidos devido à existência de afogamento do escoamento para o caudal de 0,71 L/s.

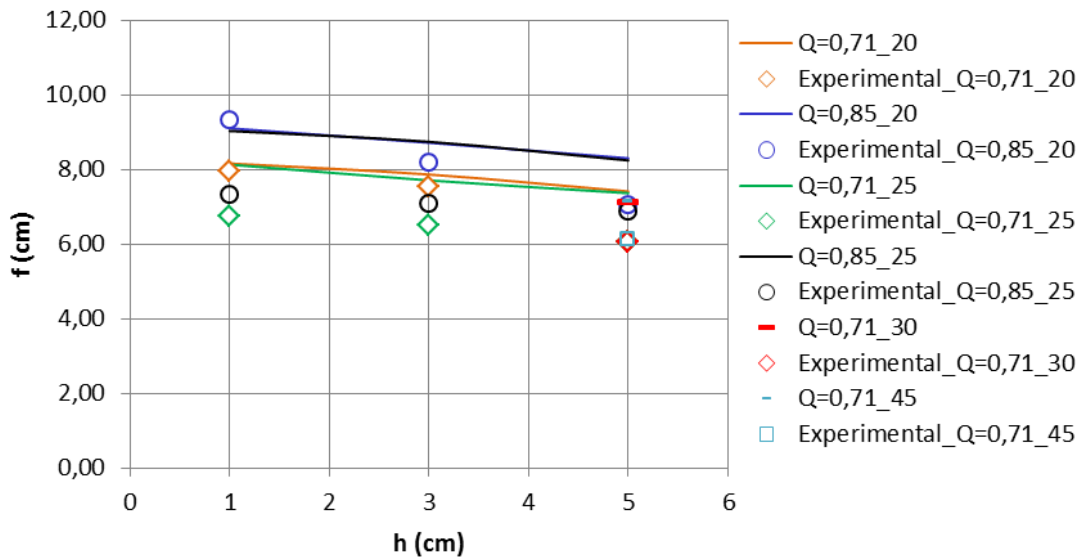


Figura 4.34- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Chian Min Wu (1973), para os diferentes valores de α .

À semelhança do verificado na Figura 4.33, os valores obtidos pela aplicação da expressão de Chian Min Wu são bastante próximos, como se pode observar pela Figura 4.34, registando-se, no entanto, um ligeiro decréscimo dos valores de f com o aumento de α .

Por outro lado, verifica-se, pela análise da Figura 4.35, que a aplicação da expressão de Yildiz & Uzupek (A) (1994) se traduz, com o aumento do ângulo de saída do trampolim, num acréscimo da profundidade máxima de erosão.

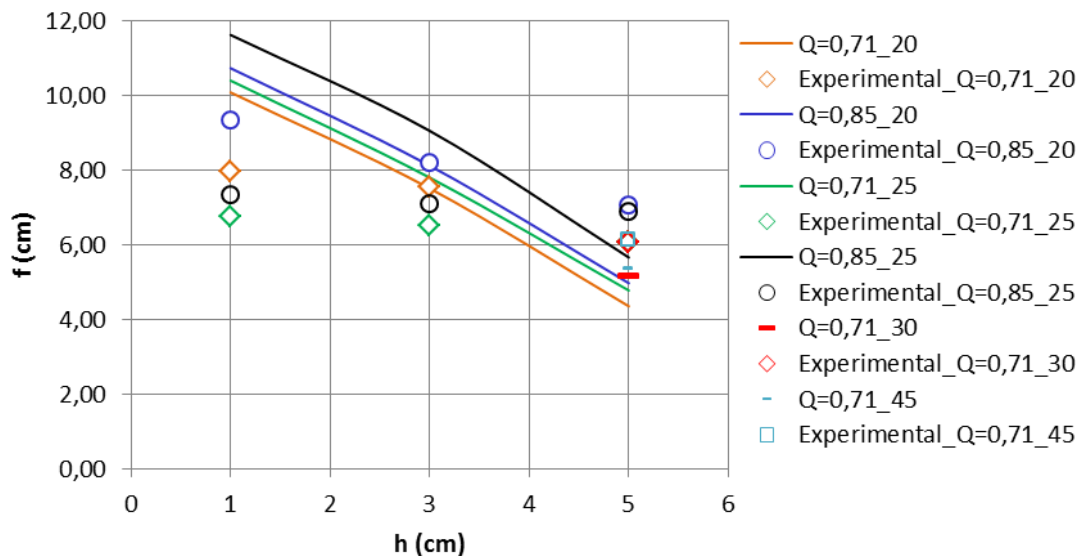


Figura 4.35- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Yildiz & Uzupek (A) (1994), para os diferentes valores de α .

A disparidade existente entre os valores teóricos é justificada pelas diferenças presentes no valor de α' medido experimentalmente. Verificou-se que, com o aumento do ângulo de saída do trampolim, o valor do ângulo de incidência do jato era superior, obtendo-se, por isso valores teóricos mais elevados.

Verifica-se ainda que, em geral, a inclinação das curvas é mais acentuada do que a verificada para os valores experimentais. Esta diferença está igualmente relacionada com o ângulo de incidência medido visto que entre os valores correspondentes a $h = 1$ cm e $h = 5$ cm existe uma variação de aproximadamente 12 %.

Apesar de não se aproximar dos valores medidos experimentalmente, para $\alpha = 20^\circ, 30^\circ$ e 45° , optou-se por representar, na Figura 4.36, os valores obtidos através da aplicação da expressão de Damle (A) (1966), uma vez que se traduz numa melhor aproximação para $\alpha = 25^\circ$.

Pode-se constatar que, os valores teóricos da profundidade máxima vão diminuindo com o aumento de α , fenómeno que também se verifica experimentalmente. No entanto, esta expressão resulta, na sua generalidade, em valores de f inferiores, comparativamente com os valores experimentais (Figura 4.36).

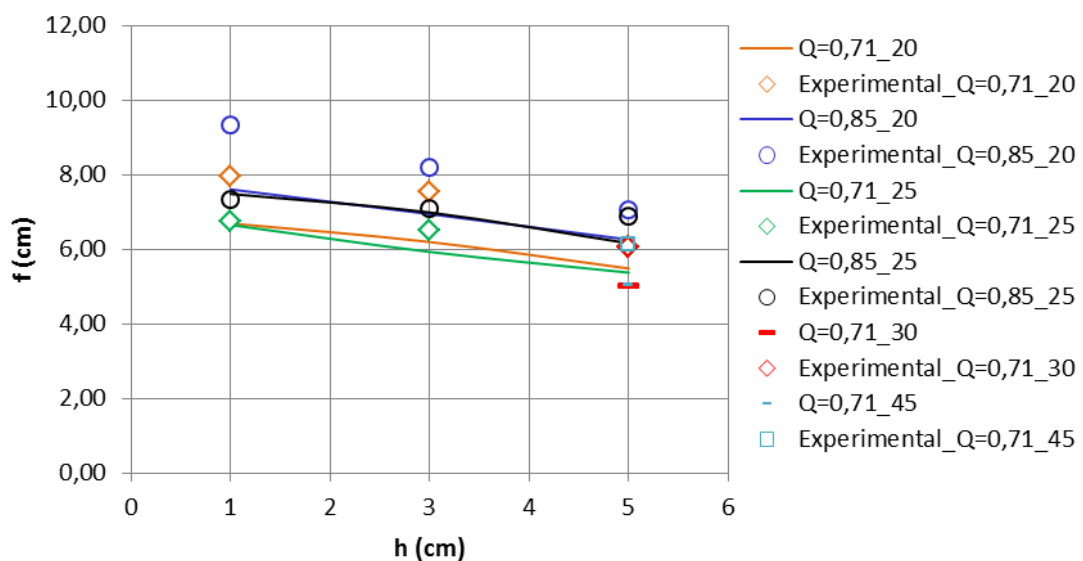


Figura 4.36- Comparação entre os valores de f medidos e os obtidos pela aplicação da expressão de Damle (A) (1966), para os diferentes valores de α .

De um modo geral verifica-se que não existe um comportamento comum a todas as fórmulas, nomeadamente no que diz respeito à tendência de evolução, que permita retirar conclusões concretas acerca da influência do ângulo de saída do trampolim na previsão da profundidade máxima de erosão.

4.6.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. Em 2.3.4 apresentam-se algumas expressões, desenvolvidas por Martins (A) (1984), Azmathullah et al. (2004), Naini (2011), Ghodsian (A) (1999) e Ghodsian (B) (2012), 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^* . Na fotografia da Figura 4.37, correspondente ao ensaio realizado para $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm, estão representadas as respetivas variáveis. No anexo G encontram-se as fotografias das escavações resultantes nos restantes ensaios realizados.

Analisando os limites de validade das diferentes expressões, constatou-se que a expressão de Martins (A) (1984) só poderia ser aplicada para $\alpha = 45^\circ$. As restantes expressões foram aplicadas em todas as condições, procedendo-se à comparação dos valores teoricamente esperados com os obtidos experimentalmente.

Nos quadros 4.12 a 4.14 apresentam-se os valores obtidos para os ensaios realizados com o ângulo de saída de 20° . Optou-se também por apresentar os valores obtidos para $\alpha = 45^\circ$ (quadro 4.15) uma vez que é apenas nesta condição que se aplica a expressão de Martins (A) (1984). Os resultados obtidos com os restantes modelos de trampolim apresentam-se no anexo G.

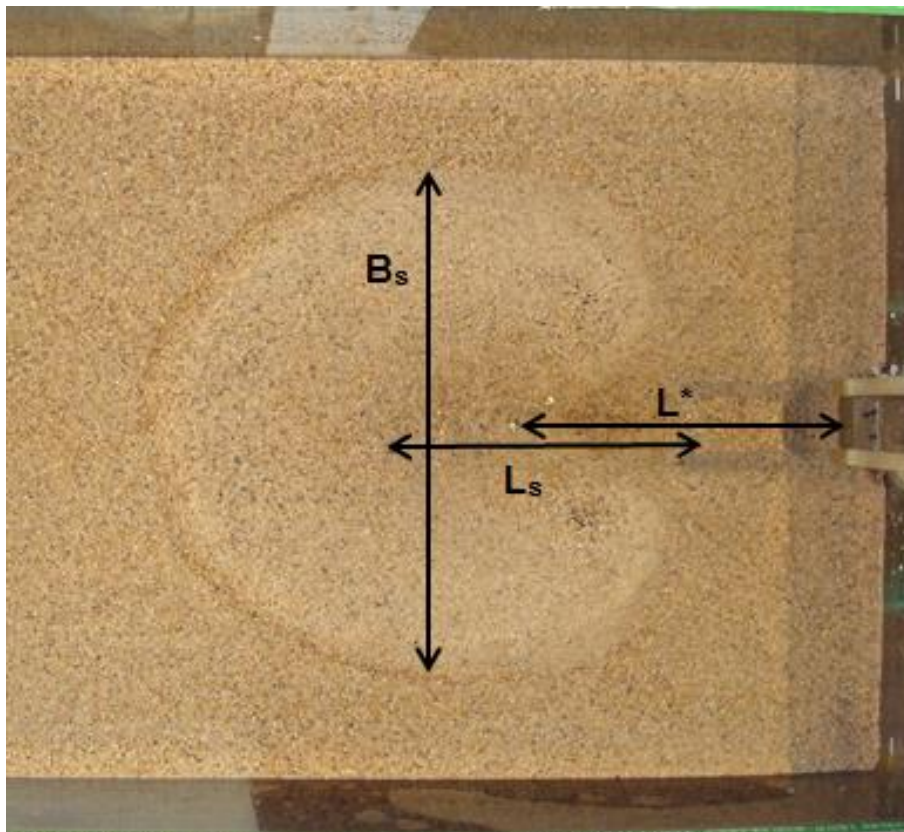


Figura 4.37- Dimensões em planta da escavação ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

Note-se que, Naini (2011) só tem em consideração a largura da escavação, não considerando a influência da barra. Com efeito, os valores obtidos não são comparáveis.

De um modo geral verifica-se que os valores determinados através da aplicação das diversas expressões não traduzem uma boa aproximação dos valores medidos experimentalmente.

As diferenças registadas poderão ser justificadas pela discordância existente entre as condições de aplicabilidade das diferentes expressões e as condições de teste adotadas no presente estudo.

Quadro 4.12- Comparação dos valores de L^* , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).

Autor	L^*								
	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 (2004)	46,99	45,31	42,48	55,05	53,30	49,99	60,64	61,25	55,24
Naini (2011)	36,93	34,51	30,82	41,90	39,68	35,41	45,78	46,95	38,82
Ghodsian (A) (1999)	8,63	8,75	8,07	9,35	9,64	8,88	9,99	11,25	9,51
Experimental	12	14	14	18	18	20	20	22	24

Quadro 4.13- Comparação dos valores de B_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).

Autor	B_s								
	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 (2004)	19,53	19,47	17,92	20,17	20,48	18,81	20,98	23,15	19,60
Naini (2011)	4,97	4,90	4,86	4,99	4,92	4,88	5,00	4,94	4,89
Ghodsian (B) (2012)	262,22	242,52	221,48	268,80	251,52	229,47	276,36	273,34	236,22
Ghodsian (A) (1999)	25,09	28,90	28,06	28,20	33,05	32,04	30,78	39,63	35,09
Experimental	53	39,5	28	64	49	32	67	53	38

Quadro 4.14- Comparação dos valores de L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 20^\circ$ (medidas em cm).

Autor	L_s								
	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)	40,23	30,82	26,19	50,71	38,79	33,00	57,92	45,67	37,86
Ghodsian (B) (2012)	187,93	57,04	112,56	197,42	153,29	120,77	208,60	180,84	127,92
Experimental	28	30,5	29	36,5	42	41	40,5	48	47

Quadro 4.15 Comparação dos valores de L^* , B_s e L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha=45^\circ$ (medidas em cm)

Autor	$h=5\text{cm}$					
	$Q = 0,71 \text{ L/s}$			$Q = 1,19 \text{ L/s}$		
	L^*	B_s	L_s	L^*	B_s	L_s
Martins (A) (1984)	-	12,43	17,20	-	13,79	19,09
Azmathullah (2004)	34,83	13,55	-	48,17	16,56	-
Naini (2011)	14,45	17,66	31,87	20,29	17,82	48,35
Ghodsian (B) (2012)	-	123,04	71,85	-	141,23	94,48
Ghodsian (A) (1999)	8,02	28,74	-	10,64	40,84	-
Experimental	14	34	26	26	53	47

Nas Figuras 4.38 e 4.39 encontram-se representados os resultados experimentais correspondentes a B_s para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, respetivamente. Como se pode observar, para cada caudal, existe uma tendência linear de evolução da largura da escavação com a diminuição da espessura do colchão de água. Verifica-se também que, com o aumento do caudal, e para cada h , o valor de B_s é superior.

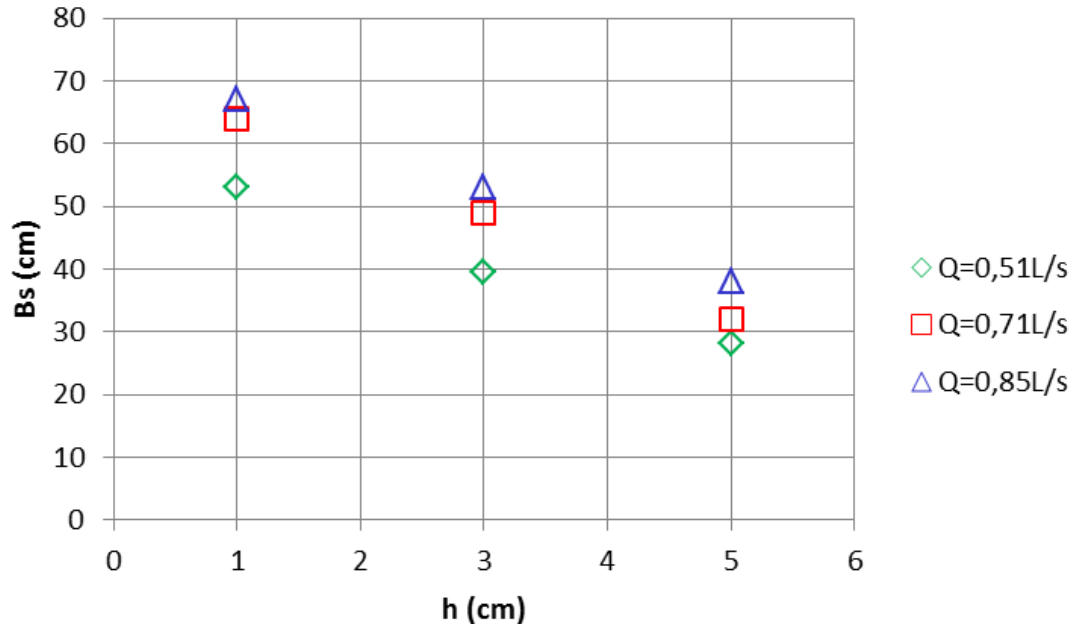


Figura 4.38- Representação gráfica dos valores da largura da escavação para $\alpha = 20^\circ$.

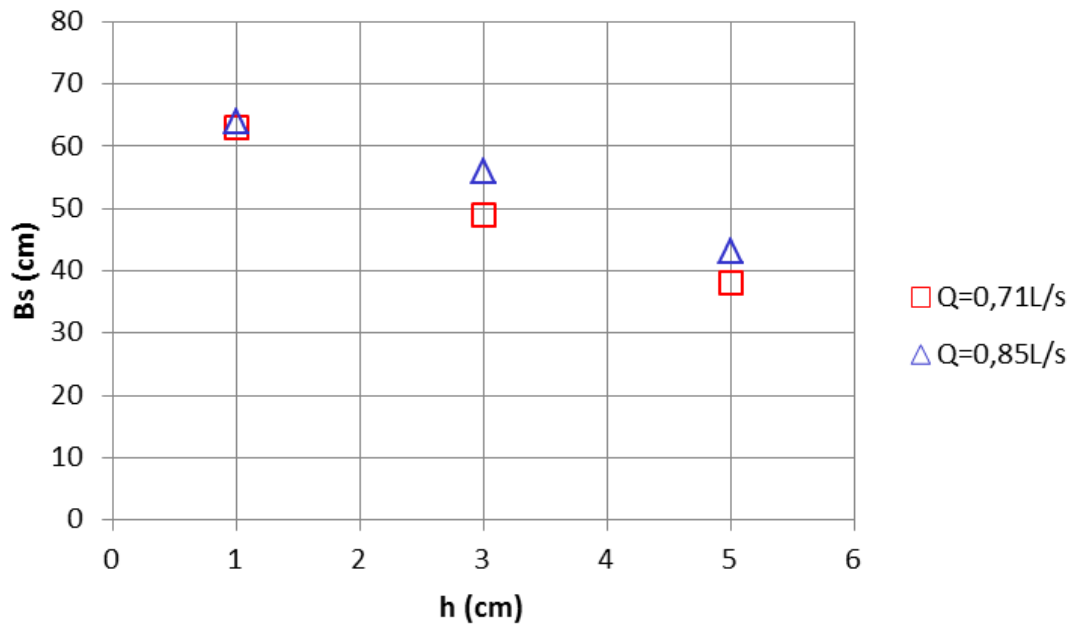


Figura 4.39 – Representação gráfica dos valores da largura da escavação para $\alpha = 25^\circ$.

Na Figura 4.40 realiza-se uma comparação dos valores experimentais da largura da escavação para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$. Como se pode constatar, os valores obtidos para os dois modelos de trampolim são muito semelhantes. Deste modo, pode-se afirmar que o valor do ângulo de saída do trampolim não tem influência no desenvolvimento da largura da escavação, contrariamente ao verificado na profundidade máxima.

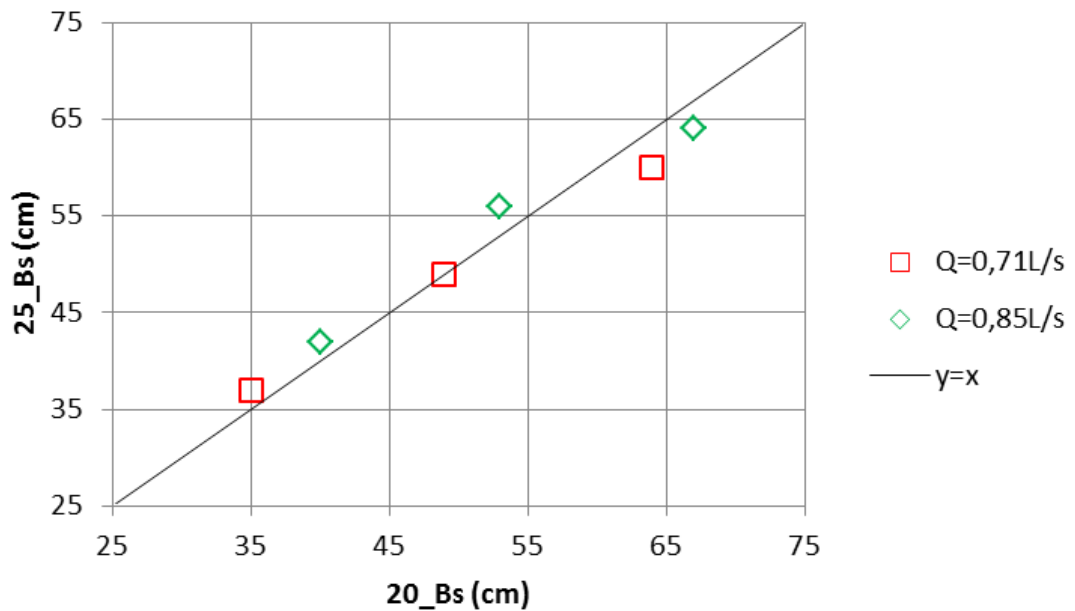


Figura 4.40- Comparação entre os valores experimentais de B_s para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$.

No que diz respeito aos resultados experimentais relativos a L_s , estes são representados nas Figuras 4.41 e 4.42 para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, respetivamente.

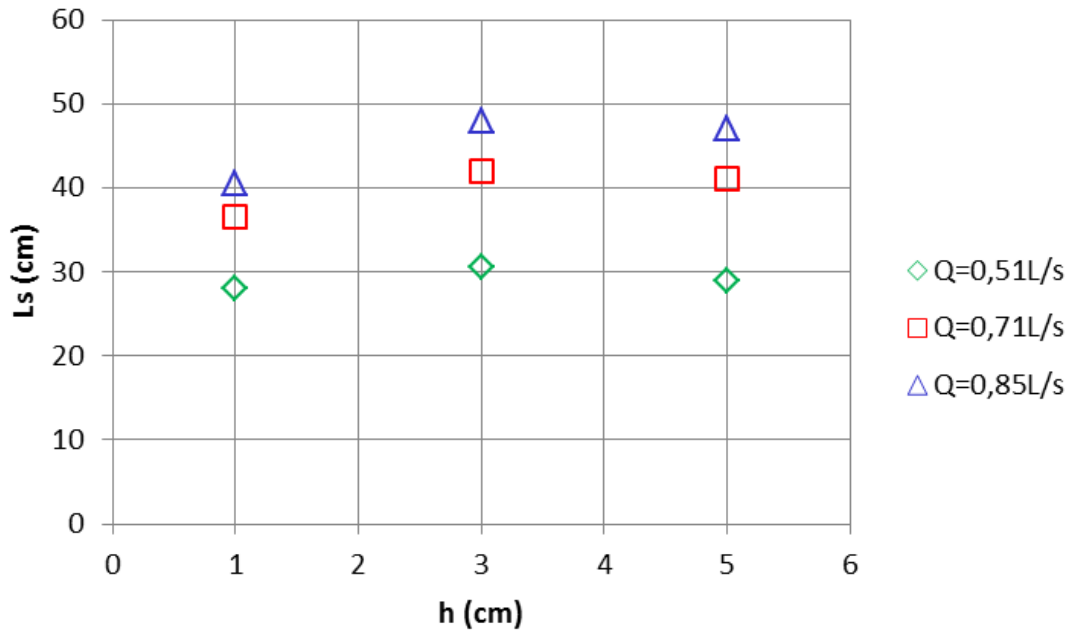


Figura 4.41 - Representação gráfica dos valores da extensão da escavação para $\alpha = 20^\circ$.

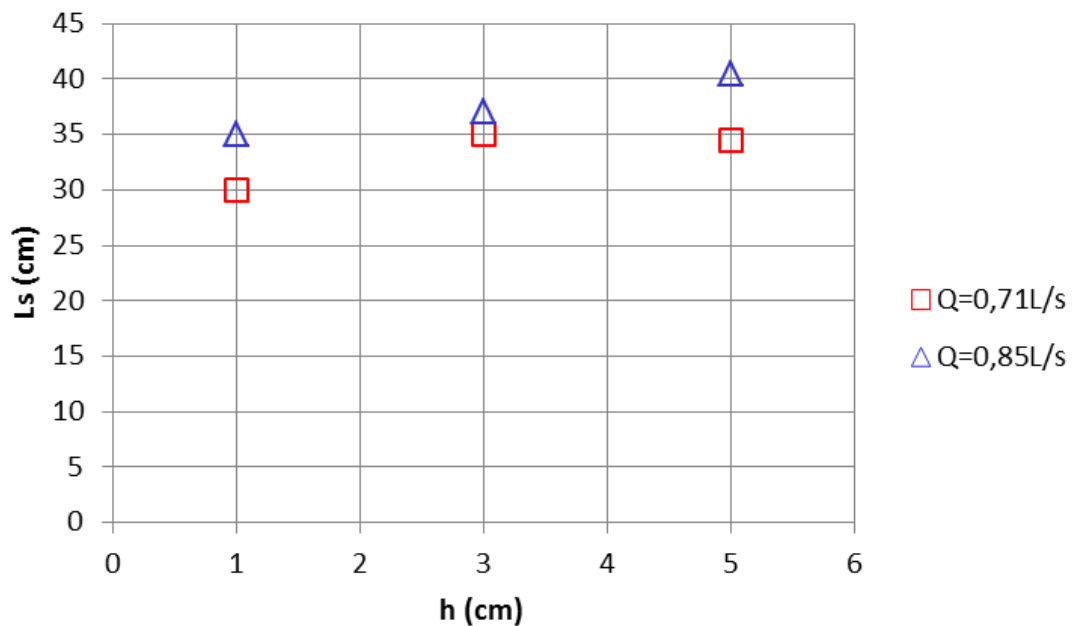


Figura 4.42 - Representação gráfica dos valores da extensão da escavação para $\alpha = 25^\circ$.

Contrariamente ao verificado para a largura da escavação, a tendência de evolução da sua extensão não adquire um comportamento linear. Como já se tinha constatado pela observação dos perfis de erosão representados nas Figuras 4.15 a 4.17., a erosão é mais acentuada para o caso de $\alpha = 20^\circ$, razão pela qual se verifica uma maior extensão da escavação (Figura 4.43).

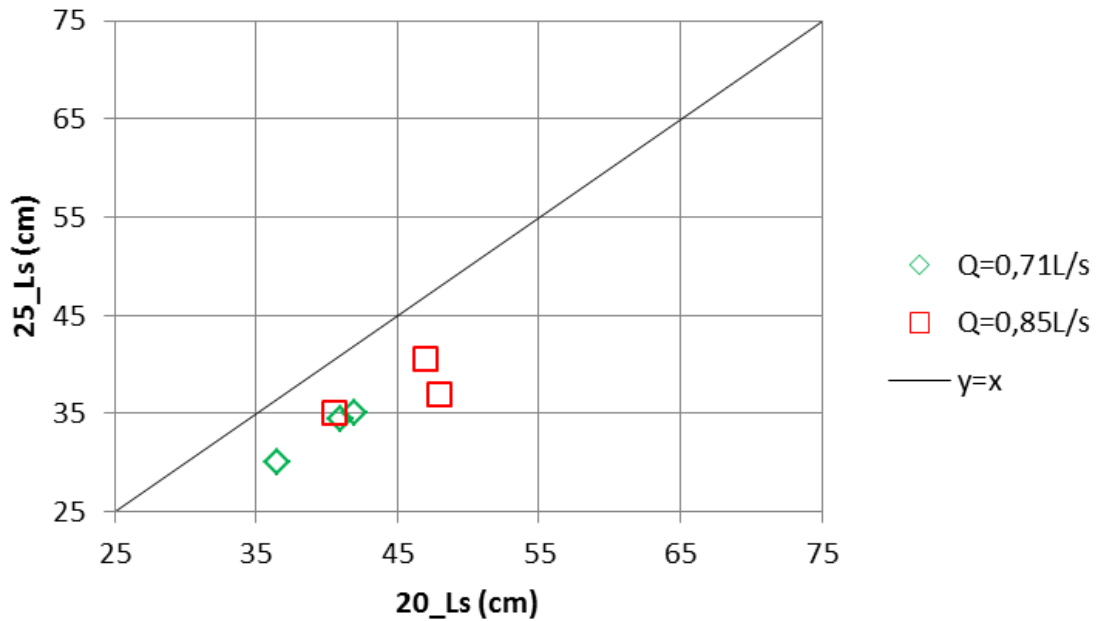


Figura 4.43 - Comparação entre os valores experimentais de L_s para $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$.

4.7.MEDIÇÃO DO VOLUME E CONFIGURAÇÃO 3D DA ESCAVAÇÃO

Tal como referido em 3.5.4, procedeu-se à medição do volume e configuração 3D da escavação através de duas metodologias. A primeira, baseada num código desenvolvido em Matlab, é apresentada nas Figuras 4.44 a 4.47, correspondentes às seguintes condições: $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71\text{ L/s}$ e $h = 3\text{cm}$ (Figuras 4.44 e 4.45); $\alpha = 25^\circ$ e $Q = 0,71\text{ L/s}$ e $h = 3\text{ cm}$ (Figuras 4.46 e 4.47).

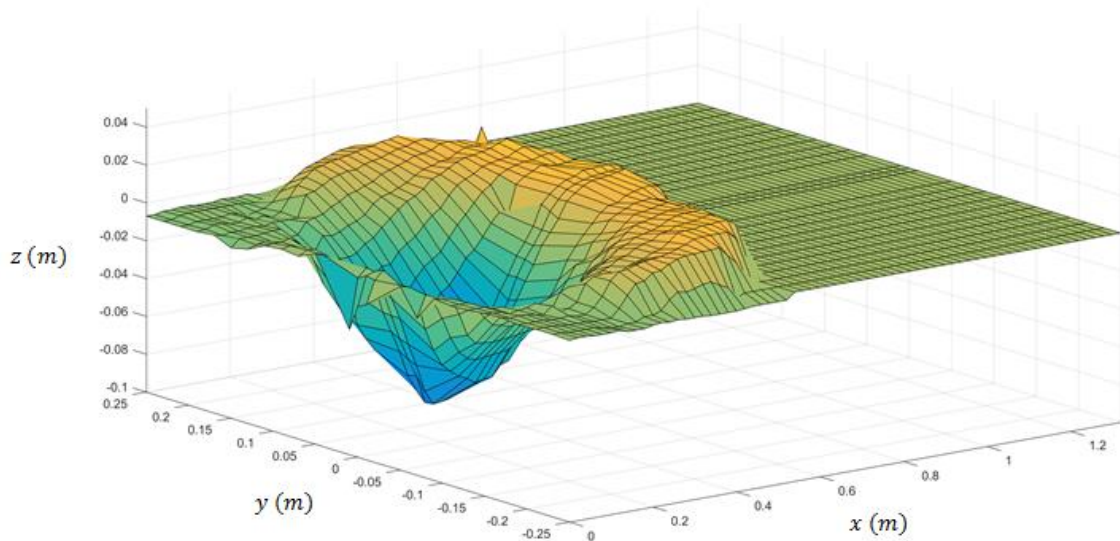


Figura 4.44- Configuração 3D para a condição $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71\text{ L/s}$ e $h = 3\text{ cm}$.

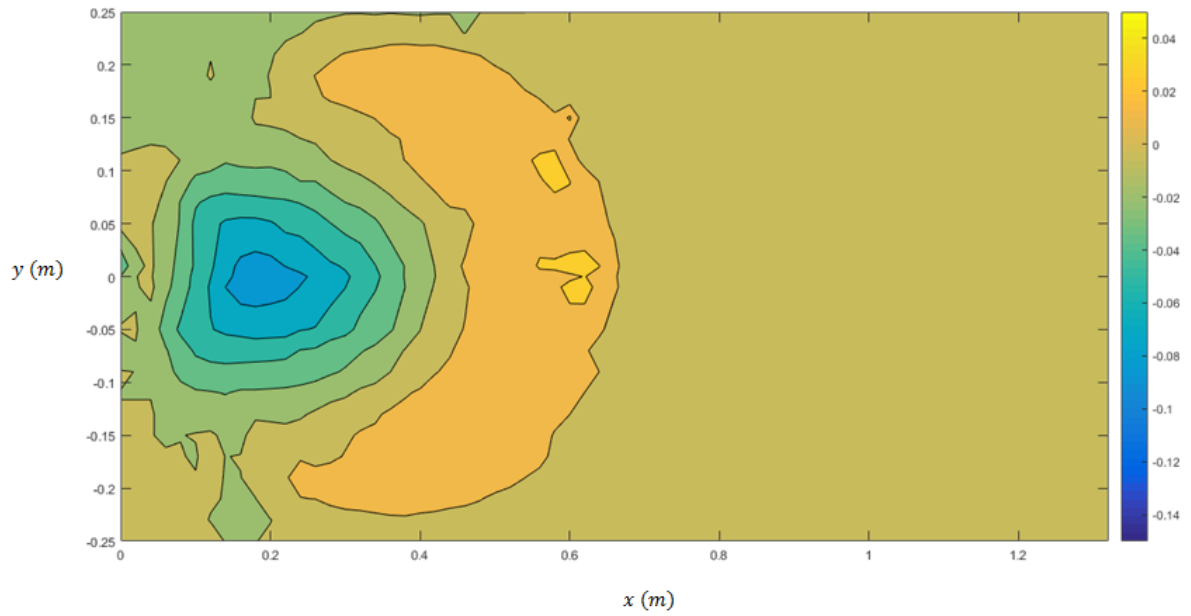


Figura 4.45 – Contorno da escavação para $z = 0$ ($\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

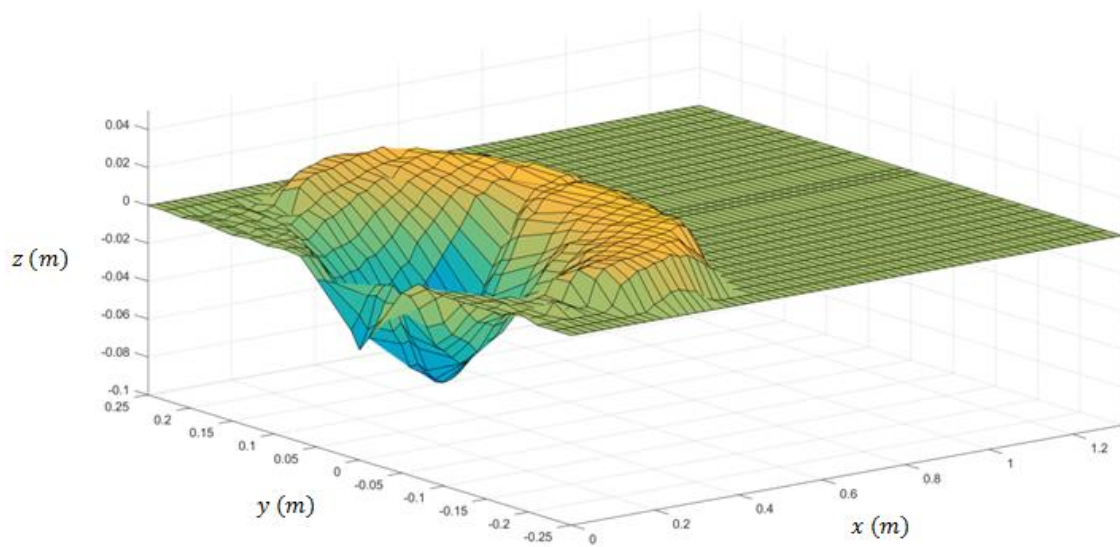


Figura 4.46 - Configuração 3D para a condição $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm.

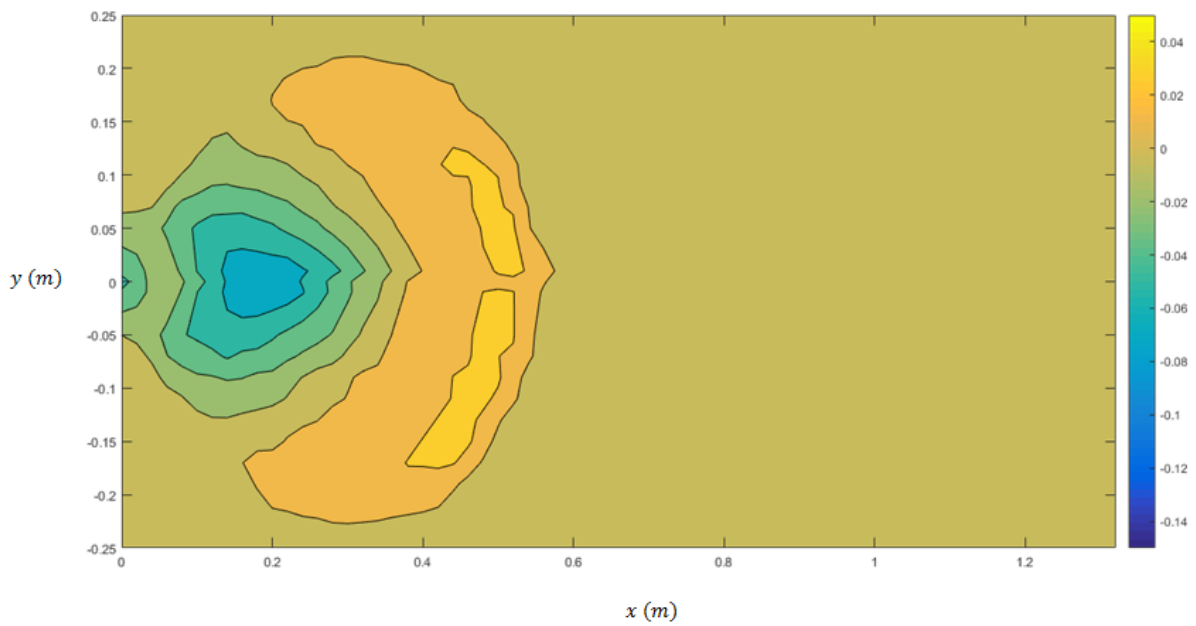


Figura 4.47 – Contorno da escavação para $z = 0$ ($\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

O recurso à segunda metodologia (scanner 3D) permitiu obter para a condição $\alpha = 25^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm um modelo 3D (Figura 4.48) da escavação bem como o seu volume (1,85L).

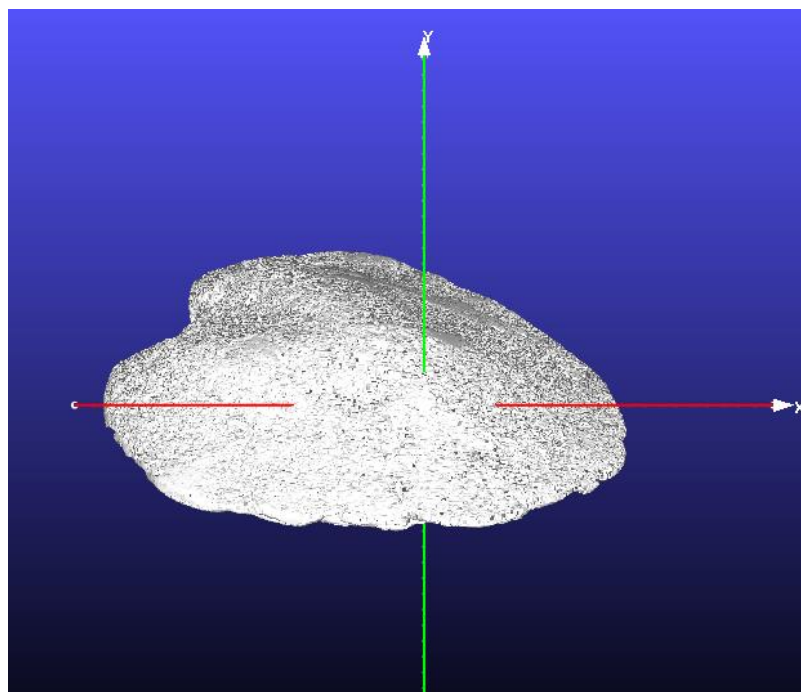


Figura 4.48 – Modelo 3D da escavação – vista de frente (Molde, em gesso, da escavação resultante ($\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm).

O volume da escavação medido pelo princípio de Arquimedes é apresentado no quadro 4.16 para as duas situações.

Quadro 4.16 – Volume da escavação, em litros.

$\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm	$\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm
3	2,5

Como se pode constatar através do quadro 4.16, o volume da escavação é inferior na condição $\alpha = 25^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm. Este fator justifica-se pelo facto de o leito apresentar uma menor erosão nesta situação, como observado nas representações gráficas das Figuras 4.15 e 4.16.

Verifica-se ainda que os valores obtidos para o volume diferem nas duas metodologias utilizadas. Note-se que, nas medições realizadas no reservatório calibrador, o molde em gesso absorve uma certa quantidade de água, influenciando assim o volume deslocado. A esta medição poderão estar ainda associados alguns erros de leitura.

4.8. EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESCAVAÇÃO DE EROSIÃO

Para compreender a evolução da erosão ao longo do tempo, realizou-se um ensaio ao longo de nove horas. No decorrer do ensaio foram tiradas fotografias, de cima, que permitiram, com recurso ao GIMP e a um código desenvolvido em Matlab, definir o contorno da erosão. As fotografias foram tiradas segundo uma sequência temporal, em que até à primeira hora, o intervalo de tempo foi de 15 min, até à segunda hora foi de 30 min e a partir da segunda hora foi de 1 hora, perfazendo um total de 13 fotografias. Note-se que, devido à dificuldade em identificar os limites da escavação, esta análise centrou-se na configuração da evolução da barra (Figura 4.49). É para já uma análise mais qualitativa que quantitativa, mas que poderá ser desenvolvida em trabalho futuro.

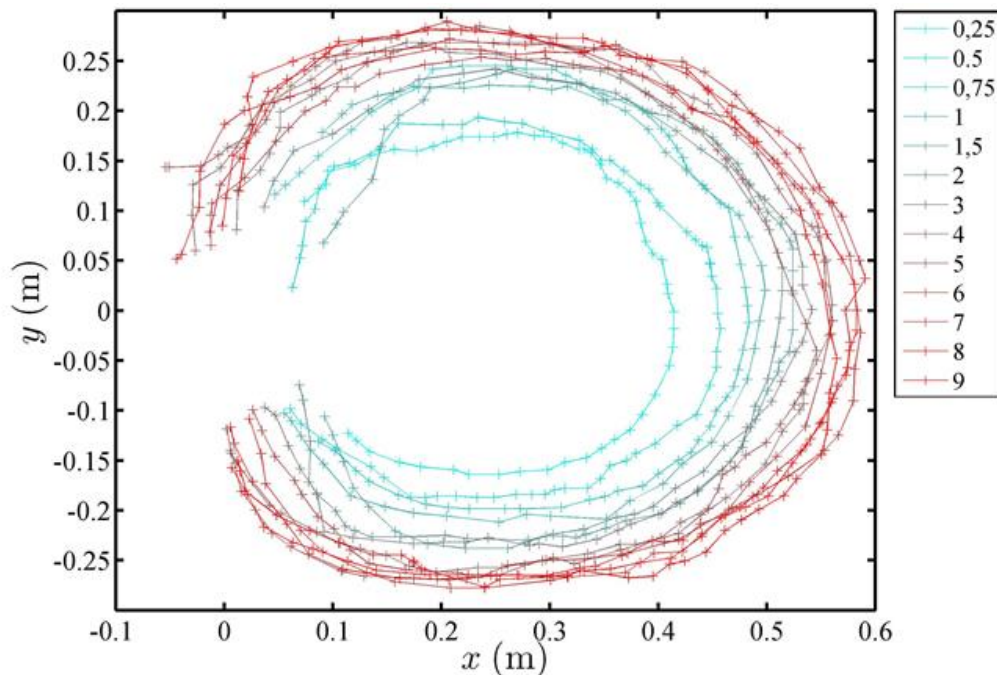


Figura 4.49 – Evolução da erosão ao longo do tempo (em horas).

Pela observação da Figura 4.49 verifica-se que, na direção de x , devido à existência de algum transporte de sedimentos, a barra não estabiliza completamente ao fim das nove horas de ensaio. No entanto, a variação registada é muito pequena. Relativamente à largura da escavação, pode constatar-se que ao final da quarta hora esta assume valores praticamente iguais. Deste modo, pode-se afirmar que, provavelmente, as escavações obtidas nos diferentes ensaios realizados ainda não estavam completamente estabilizadas.

As Figuras 4.50 e 4.51 representam a posição máxima da barra no eixo dos xx e a velocidade de evolução da barra, respetivamente.

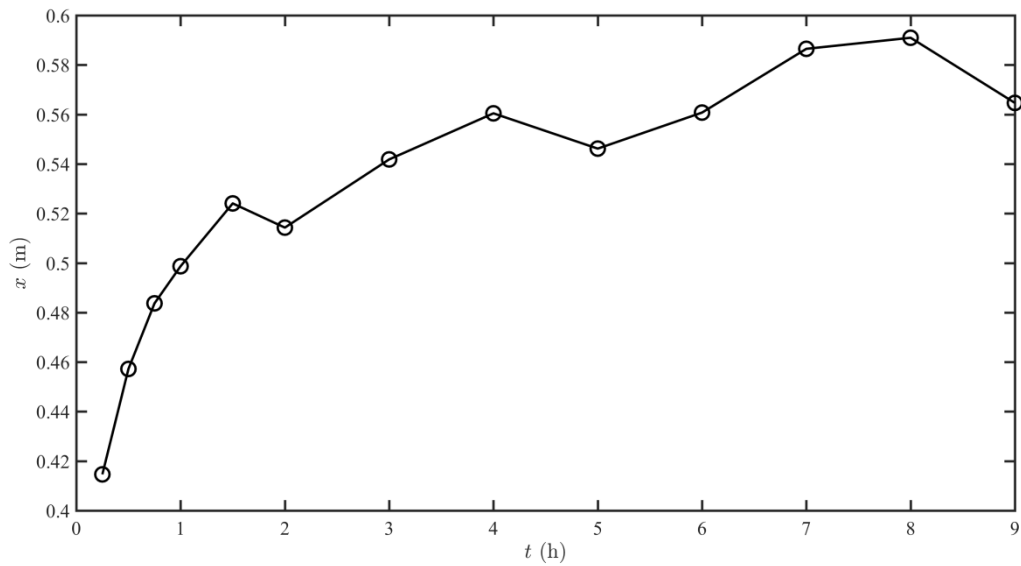


Figura 4.50 – Posição máxima da barra no eixo dos xx , em função do tempo (h).

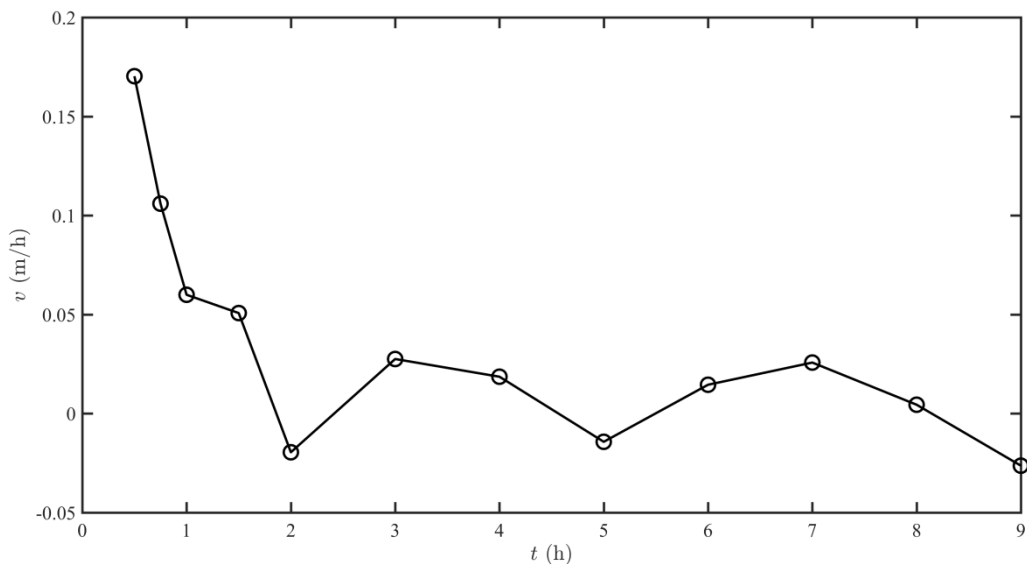


Figura 4.51 – Velocidade de evolução da barra (m/h).

Verifica-se que, durante as primeiras duas horas a evolução da barra é mais acentuada, apresentando apenas um acréscimo de aproximadamente 6,5 cm até ao final do ensaio. As variações registadas, nomeadamente na segunda, na quinta e na nona hora poderão estar associadas a erros existentes na seleção dos pontos que definem o contorno da barra de erosão.

É importante realçar que esta análise apenas foi realizada para uma condição. Para estudar com mais detalhe este fenómeno, ensaios com uma duração superior e para diferentes condições de escoamento devem ser realizados.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação centrou-se na análise da erosão a jusante de um descarregador de cheias em degraus equipado com um trampolim em salto esqui.

O trabalho realizado consistiu na definição das características do jato e na caracterização da escavação de erosão resultante da ação deste, para diferentes condições definidas por vários caudais escoados, alturas do colchão de água a jusante e ângulos de saída do trampolim. Posteriormente procedeu-se à comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os esperados pela aplicação das expressões empíricas e semiempíricas propostas por diversos autores. Realizou-se também uma análise comparativa entre estes e os resultados obtidos no estudo de Figueiredo (2010) para o ângulo de saída do trampolim de 20°.

A definição das características do jato consistiu na determinação da altura de água na secção de saída do trampolim, do alcance, ângulo de incidência e das coordenadas da trajetória do jato. No que diz respeito às técnicas de medição utilizadas, nomeadamente a técnica de aquisição de imagens, pode-se afirmar que esta se revelou bastante eficaz. No entanto, apesar de os valores obtidos para a altura do escoamento no trampolim serem satisfatórios, o método utilizado para a sua medição necessita de ser explorado e aperfeiçoado uma vez que a dificuldade inerente à definição do limite da lâmina de água na imagem pode resultar em diferenças no valor de h_0 . O registo das coordenadas do jato permitiu concluir que a equação da trajetória, devido à espessura e dispersão do jato, não é suficiente para a representação correta da trajetória na secção inicial. Contudo, verificou-se que em termos de alcance do jato, a equação traduz uma aproximação satisfatória.

Relativamente à escavação originada pela ação do jato, procedeu-se, no final de cada ensaio, ao levantamento dos perfis de erosão bem como das suas dimensões em planta.

Na aplicação das expressões listadas na revisão bibliográfica houve uma certa dificuldade em definir as condições de aplicabilidade de cada uma, o que poderá justificar as discrepâncias existentes entre os valores teoricamente esperados e os medidos experimentalmente. Conclui-se que, para a previsão da profundidade máxima da escavação, a expressão de Mason & Arumugam (1985) foi a que conduziu a um melhor ajuste para o modelo de trampolim de 20°. Para os restantes ângulos de saída do trampolim verificou-se que a expressão de Damle (A) (1966) era a mais adequada. É de notar que as duas expressões não consideram as características do material granular utilizado. A primeira mencionada fixa o valor de d_m em 0,25 m e a segunda assume que a profundidade não depende das dimensões do material do leito.

Comparativamente aos valores teóricos obtidos por Figueiredo (2010) verificou-se, na generalidade, a ocorrência de valores superiores. O facto de os valores da altura de queda e das dimensões

caraterísticas da areia serem inferiores no presente estudo poderá estar na base das diferenças registadas.

A representação dos perfis longitudinais de erosão permitiu concluir que a profundidade da escavação diminui com o aumento da espessura do colchão de água e, conseqüentemente, a barra formada a jusante apresenta uma altura maior e menor extensão. Constatou-se que os valores dos ângulos formados a montante e a jusante da barra com a horizontal, θ_1 e θ_2 , para todas as condições, eram bastante distintos do ângulo de repouso da areia. No entanto, mostraram ser semelhantes entre cada condição. Verificou-se também que a altura da barra era condicionada pela espessura do colchão de água nas situações em que $h = 1$ cm e $h = 3$ cm. Uma análise das flutuações de pressão ajudaria a compreender melhor o efeito atenuador do colchão de água.

No que diz respeito aos valores experimentais obtidos com os diferentes modelos de trampolim, nomeadamente com $\alpha = 20^\circ$ e $\alpha = 25^\circ$, constatou-se que, apesar de o alcance ser ligeiramente superior na segunda situação, a erosão do leito foi menos notória. Este fenómeno poderá ser justificado pela existência de uma maior perda de energia associada à maior dispersão do jato e também pelo facto de a distância a percorrer pelo jato ser superior, devido à maior altura do modelo do trampolim. A diminuição da profundidade máxima com o aumento do ângulo de saída é também verificada pela aplicação de algumas fórmulas, nomeadamente a de Damle (A) (1966). O estudo com caudais superiores permitiria analisar mais detalhadamente a influência do ângulo de saída do trampolim. No entanto, para que não houvesse realimentação, seria necessário aumentar a largura da bacia de restituição.

A análise comparativa realizada entre as profundidades medidas no presente estudo e no estudo de Figueiredo (2010) permitiu constatar que, tal como previsto pela aplicação das diversas expressões, a profundidade máxima da escavação, para as várias condições estudadas, é superior neste estudo. As dimensões da bacia de restituição, a duração de cada ensaio e as dimensões da areia utilizada poderão justificar esta diferença. A realização de um estudo com a aplicação de diferentes materiais no leito possibilitaria aprofundar a análise da influência das respetivas caraterísticas na configuração da escavação originada pela ação do jato.

Relativamente às dimensões em planta verificou-se que a largura da escavação evolui linearmente com a diminuição do colchão de água. No entanto, o mesmo não se verificou com a evolução da extensão da escavação. A aplicação das expressões apresentadas não permitiu tirar qualquer conclusão acerca da previsão do desenvolvimento da escavação.

A análise da evolução da erosão ao longo do tempo permitiu concluir que a duração de ensaio utilizada não é suficiente para garantir a estabilização da barra. No entanto, para compreender melhor o processo de evolução da escavação é necessário realizar mais medições.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em consideração o acima referido e as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sugere-se a realização dos seguintes trabalhos:

- Aumentar as dimensões do canal de restituição, nomeadamente a sua largura, permitindo, deste modo, testar caudais superiores;
- Realizar ensaios com ciclos de caudais com o intuito de estudar o comportamento do leito perante as diferentes condições hidrológicas ;
- Analisar a influência do ângulo de saída do trampolim em salto de esqui, utilizando novos ângulos com o intuito de consolidar os resultados obtidos;

- Explorar e consolidar o método utilizado para a medição da altura do escoamento na secção de saída do trampolim;
- Analisar a evolução da erosão ao longo do tempo, realizando ensaios com diferentes durações;
- Aplicar vários materiais na constituição do fundo móvel para analisar a influência das dimensões das partículas na configuração da escavação de erosão, tendo em consideração o efeito de escala dos sedimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleixo, R., Proença, M.F. (2007). *Medição da trajetória de um jato livre usando aquisição de imagens*. 2^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Outubro.
- Alias, N., Mohamed, T., Ghazal, A., Noor, M. (2008). *Impact of takeoff angle of bucket type energy dissipater on scour hole*. American Journal of Applied Sciences, 117-121.
- Alireza, P., Mahmood, S., Habib M. (2008). *Impact of lip angle of flip bucket energy dissipater on scour hole*. 3rd IASME/ WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, February, 126-130, UK.
- 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., Deo, M, Bhajantri, M e Deolalikar, F. (2004). *Scour at the base of flip-bucket spillways*. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 121-129.
- Bisaz, 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.
- Bollaert, 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., Gioia, G (2006). *Scouring of granular beds by jet-driven axisymmetric turbulent cauldrons*. Physics of Fluids, Vol.18, nº8.
- 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., 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.
- Chee, S., Kung, T. (1974). *Piletas de derrubio autodormadas*. 6º Congresso Latino-Americano da AIRH, Bogotá, Colombia.
- Chee, S.P.,Padivar, P.V. (1969). *Erosion at the base of flip buckets*. Engineering Journal, Vol.52, 22-24, Canadá.
- Damle, P., et al (1966). *Evaluation of scour below ski kumo bucke of spillways*. Proc. Golden Jubilee Symp., 154-164, Poona.
- Doddiah, D. et al. (1953). *Scour from jets*. 5th Congress of the International Association for Hydraulic Research, 161-169, Minneapolis.
- Eggenberger, W.,Muller, R. (1944) - *Experimentalle und theoretische untersuchungen über das kolkproblem*. Versuchsanstalf für Wasserbau, Zürich.
- Ervine, D.A. (1976). *The entrainment of air in water*. Water Power & Dam Construction, December, 27-30.

- Fernandes, M. M., (2012). *Mecânica dos Solos. Vol. 1 : Conceitos e Princípios Fundamentais*. FEUP edições, Porto.
- 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.
- Franke, P.G. (1960). *L'affouillement: mécanisme et formes*. Oesterreichische Wasserwirtschaft (Tradução nº. 681 da Electricité de France).
- Ghodsian, M., Faradonbeh, A., Abbasi, A. (1999). *Scour downstream of free over fall spillway*. Proceedings of 28th IAHR Congress, Graz, Áustria.
- Ghodsian, M., Mehraein, M., Ranjbar, H. (2012). *Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment*. Scientia Iranica, Vol. 19, nº6, 1437-1444.
- Gunko, F.G., et al. (1965). *Research on the hydraulic and local scour of river bed bellow spillways of high-head dams*. XI AIRH Congress, paper 1.50, Leningrad .
- Hartung, W. (1959). *Affouillement à l'aval des barrages déversants, lié à la formation de fonds mobiles sous le déversement*. Die Wasserwirtschaft, nº12 (Tradução nº670 da Electricité de France).
- Heng, S., Tingsanchali, T., 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*. River Basin Management.
- Hoffmans, Gijts JCM (1998). *Jet scour in equilibrium phase*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 124, nº4, 430-437.
- Jaeger, C. (1939). *Über die Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellversuchen*. Wasserwirtschaft und Wassertechnik, Vol. 34, nº 23/27.
- Kamaneve, I.A. (1966). *Alcance de jactos livres provenientes de descarregadores*. Hidrotekhnicheskoe 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.
- 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 do LNEC, Lisboa.

- Mason, P. J., Arumugam, K. (1985). *Free jet scour below dams and flip buckets*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 111, nº2, ASCE, 220-235.
- Mason, P. J. (1989). *Effects of air entrainment on plunge pool scour*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 115, nº3, ASCE, 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). *Détermination de la profondeur d'affouillement d'une fondation non rocheuse par un jet incliné*. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, nº. 0 (Trad. n.º 804 da Electricité de France).
- Mirskhulava, T.E. (1967a). *Alguns problemas da erosão local nos leitos dos rios*. Moskva (Trad. n.º 443 do LNEC).
- Mirskhulava, T.E. et al (1967b). *Mechanism and computation of local and general scour in noncohesive, cohesive soils and rock beds*. 12.º Congresso da AIRH, vol. III, Fort Collins.
- 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, Vol. 19, Singapore.
- Noori, R., 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., et al. (2007). *Hydraulic structures*. 4th ed. Oxon: Taylor & Francis
- Patrashev, A. N. (1937). *Détermination de la profondeur maximale de l'érosion du sol par une nappe tombante*. *Izvestiya VNIIG*, n.º 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.
- Pinto, F. T. (2015). *Trabalhos Marítimos 2: Apontamentos teóricos 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*
- 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. (1985). *Curso Latinoamericano de Mecánica Fluvial*. LHA, 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*. (Tradução para inglês do texto original em alemão "Kolkbauwehr und Staurationberlandung, Berlin, Julius Springer, 17- 183)

- Silva, R., Taveira-Pinto, Veloso-Gomes (2009). *Modelação física 3D com fundos móveis para avaliação de parâmetros associados à evolução da linha de costa*. 4as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP
- Sinniger, R., 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*, n.º 9.
- Veronese, A. (1937). *Erosioni de fonde a valle di uno scarico*. *Annali dei Lavori Pubblici*, Vol. 75, n.º9, 717-726, Itália.
- Whittaker, J., 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 enf of dams in Taiwan*. *Proc. IAHR Symp. On river mechanics*, Bangkok.
- Yildiz, D., Uzucek, E. (1994). *Prediction of scour depth from Free Falling Flip Bucketjets*. *International Water Power and Dam Construction*, November.
- Yildiz, D., Uzucek, E. (1996). *Scour Depth Prediction From Free Falling Flip Bucket Jets*. *Digest*, December, 393-397.
- Zhang, S., Pang, B., 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*, vol. 16, nº5, 1210-1226.
- Zvorykin, K.A., et al (1975) - *Scour of Rock bed by a jet spilling from a deflecting bucket of an overflow dam*. 16th IAHR Congress, São Paulo.

[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. 4-04-2016

ANEXOS

ANEXO A: MODELOS DE TRAMPOLIM EM SALTO ESQUI

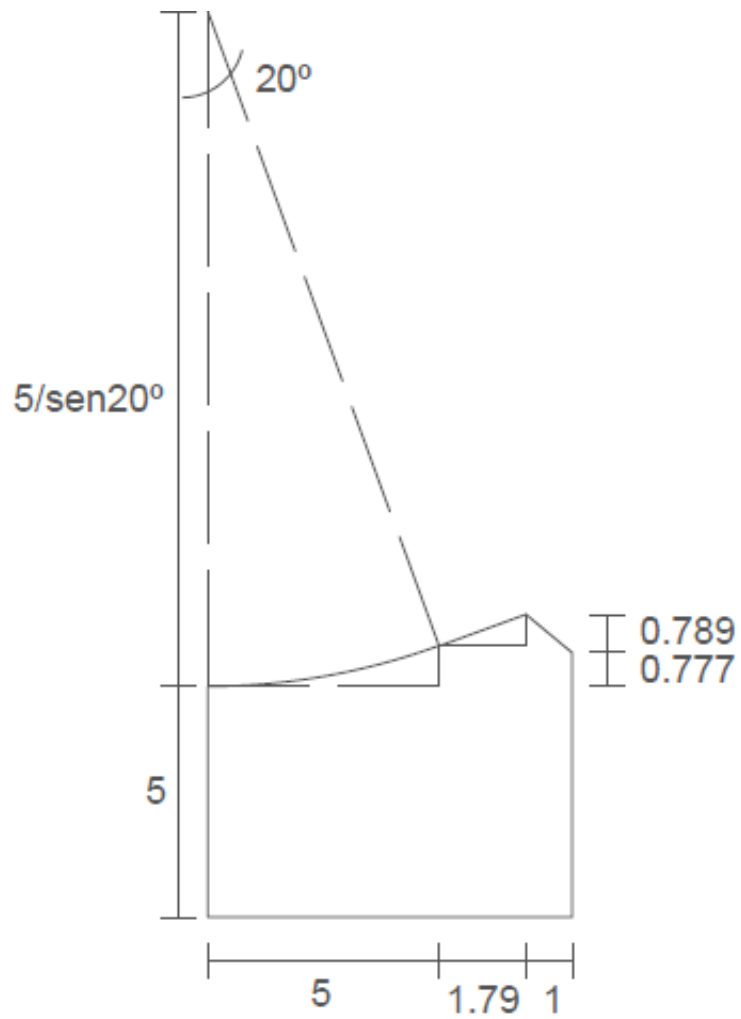


Figura A.1 - Esquema do trampolim em salto esqui com $\alpha = 20^\circ$ (medidas em centímetros).

ANEXO B: ENSAIO GRANULOMÉTRICO DO MATERIAL UTILIZADO PARA O FUNDO MÓVEL

Quadro B.1 - Dados relativos à análise granulométrica realizada.

Abertura dos peneiros (mm)	Massa Retida (R _i) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem passados acumulados (%)
63,0	0,0	0,00	0,00	100,00
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
16,0	0,0	0,00	0,00	100,00
8,0	0,0	0,00	0,00	100,00
4,0	0,1	0,05	0,05	99,95
2,0	8,1	3,81	3,86	96,14
1,0	97,2	45,72	49,58	50,42
0,500	96,4	45,34	94,92	5,08
0,250	8,7	4,09	99,01	0,99
0,125	1,4	0,66	99,67	0,33
0,063	0,2	0,09	99,76	0,24
P	0,1	0,05	99,81	0,19

ANEXO C: FATORES DE CALIBRAÇÃO PARA APLICAÇÃO DA TAI

Quadro C.1- Fatores de calibração.

α (°)	Q (L/s)	h (m)	$\beta_x=\beta_y$ (cm/px)
20	0,51	0,01	0,00876
		0,03	0,00969
		0,05	0,01028
	0,71	0,01	0,00953
		0,03	0,00788
		0,05	0,00882
	0,85	0,01	0,00869
		0,03	0,00752
		0,05	0,00895
25	0,71	0,01	0,00969
		0,03	0,01019
		0,05	0,00869
	0,85	0,01	0,00969
		0,03	0,00960
30	0,71	0,05	0,00876
		1,1	0,00909
	45	0,71	0,05
1,19		0,05	0,00903

ANEXO D: TRAJETÓRIA DO JATO

D.1: COORDENADAS

Quadro D.1-Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 20^\circ$.

Q = 0,51 L/s		Q = 0,71 L/s		Q = 0,85 L/s	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
0	0,1138	0	0,1144	0	0,1137
0,0057	0,1134	0,0066	0,1146	0,0076	0,1146
0,0113	0,1123	0,0133	0,1140	0,0151	0,1147
0,0170	0,1105	0,0199	0,1128	0,0227	0,1139
0,0227	0,1079	0,0266	0,1108	0,0302	0,1123
0,0283	0,1045	0,0333	0,1082	0,0378	0,1098
0,0340	0,1005	0,0399	0,1048	0,0453	0,1065
0,0396	0,0957	0,0466	0,1007	0,0529	0,1023
0,0453	0,0902	0,0532	0,0959	0,0604	0,0973
0,0510	0,0839	0,0599	0,0904	0,0680	0,0914
0,0566	0,0769	0,0665	0,0842	0,0756	0,0847
0,0623	0,0692	0,0732	0,0772	0,0831	0,0772
0,0680	0,06072	0,0798	0,0696	0,0907	0,0688
0,0736	0,0515	0,0865	0,0611	0,0982	0,0596
0,0793	0,0416	0,0931	0,0521	0,1058	0,0495
0,0850	0,0309	0,0998	0,0423	0,1133	0,0386
0,0906	0,0195	0,1064	0,0318	0,1209	0,0268
0,0963	0,0074	0,1131	0,0206	0,1284	0,0142
0,1019	-0,0055	0,1197	0,0087	0,1360	0,0007
0,1076	-0,0191	0,1263	-0,004	0,1436	-0,0136

Quadro D.2- Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 25^\circ$.

Q = 0,71 L/s		Q = 0,85 L/s	
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
0	0,1207	0	0,1191
0,007	0,1212	0,0080	0,1206
0,0143	0,1208	0,0163	0,1211
0,0216	0,1193	0,0245	0,1208
0,0289	0,1169	0,0326	0,1198
0,0363	0,1135	0,0408	0,1174
0,0436	0,1091	0,0490	0,1143
0,0509	0,1037	0,0571	0,1102
0,0583	0,0974	0,0653	0,1052
0,0656	0,0900	0,0735	0,0993
0,0729	0,0817	0,0816	0,0925
0,0802	0,0723	0,0898	0,0848
0,0876	0,0620	0,0979	0,0761
0,0949	0,0507	0,1061	0,0665
0,1022	0,0384	0,1143	0,0560
0,1095	0,0252	0,1224	0,0445
0,1169	0,0109	0,1306	0,0321
0,1242	-0,0043	0,1387	0,0188
0,1315	-0,0205	0,1469	0,0046
0,1388	-0,0377	0,1551	-0,0106

Quadro D.3 - Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 30^\circ$.

Q = 0,71 L/s		Q = 0,85 L/s	
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
0	0,1245	0	0,1247
0,0047	0,1232	0,0094	0,1282
0,0100	0,1213	0,0189	0,1305
0,0152	0,1188	0,0283	0,1318
0,0204	0,1157	0,0378	0,1320
0,0256	0,1119	0,0472	0,1311
0,0309	0,1074	0,0567	0,1291
0,0361	0,1024	0,0661	0,1260
0,0413	0,0967	0,0756	0,1218
0,0465	0,0904	0,0850	0,1166
0,0518	0,0834	0,0944	0,1103
0,0570	0,0758	0,1039	0,1029
0,0622	0,0675	0,1133	0,0944
0,0674	0,0587	0,1228	0,0848
0,0727	0,0491	0,1322	0,0741
0,0779	0,0390	0,1417	0,0624
0,0831	0,0282	0,1511	0,0496
0,0884	0,0168	0,1605	0,0357
0,0936	0,0047	0,1700	0,0207
0,0988	-0,0080	0,1794	0,0046

Quadro D.4 - Coordenadas da trajetória do jato para $\alpha = 45^\circ$.

Q = 0,71 L/s		Q = 0,85 L/s	
x (m)	y (m)	x (m)	y (m)
0	0,1361	0	0,1406
0,0047	0,1347	0,0102	0,1437
0,0100	0,1327	0,0205	0,1456
0,0152	0,1301	0,0307	0,1462
0,0204	0,1270	0,0410	0,1456
0,0257	0,1232	0,0512	0,1437
0,0309	0,1189	0,0615	0,1406
0,0362	0,1140	0,0717	0,1363
0,0414	0,1085	0,0820	0,1307
0,0466	0,1024	0,0922	0,1238
0,0519	0,0957	0,1025	0,1158
0,0571	0,0884	0,1127	0,1064
0,0624	0,0806	0,1229	0,0958
0,0676	0,0721	0,1332	0,0840
0,0728	0,0631	0,1434	0,0710
0,0781	0,0535	0,1537	0,0566
0,0833	0,0433	0,1639	0,0411
0,0885	0,0325	0,1742	0,0243
0,0938	0,0212	0,1844	0,0062
0,0990	0,0092	0,1947	-0,0131

D.2: ALCANCES E ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DO JATO, OBTIDOS PELAS EXPRESSÕES E MEDIDOS E EXPERIMENTALMENTE

Quadro D.5 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 20^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	L_{medido} (cm)	L_t (cm)	α'_{medido} (°)	α'_t (°)
0,51	1	10,118	9,060	61,11	63,35
	3	8,796	8,586	57,99	58,99
	5	7,415	7,732	54,25	55,31
0,71	1	11,585	11,460	58,48	59,83
	3	10,620	10,773	54,77	57,11
	5	9,940	9,253	51,1	52,74
0,85	1	13,956	13,204	58,48	59,83
	3	11,872	11,843	54,77	57,11
	5	11,424	10,520	51,1	52,74

Quadro D.6 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 25^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	L_{medido} (cm)	L_t (cm)	α'_{medido} (°)	α'_t (°)
0,71	1	11,460	11,060	64,44	65,22
	3	11,319	9,631	62,57	63,47
	5	8,794	8,859	58,98	59,32
0,85	1	13,591	12,670	61,87	62,85
	3	12,040	12,365	56,88	57,97
	5	10,672	10,524	55,38	56,18

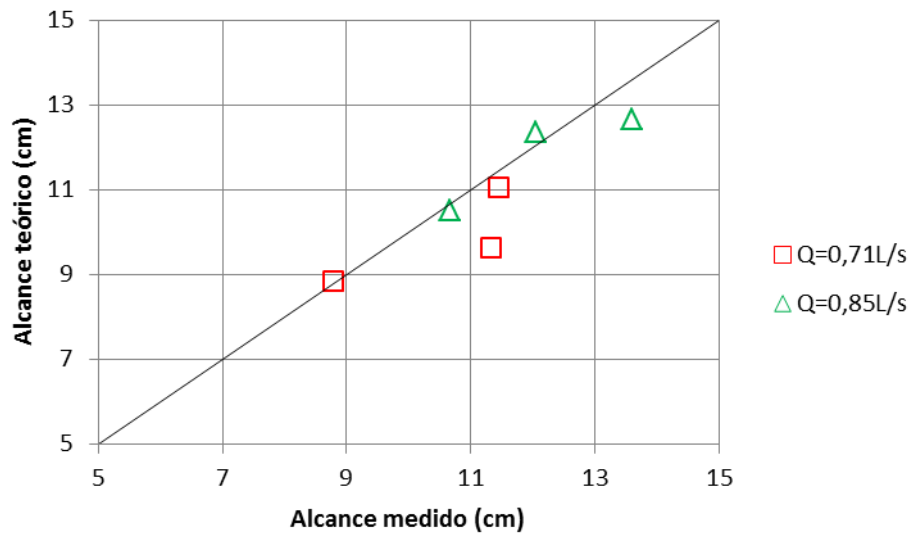


Figura D.1 – Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 25^\circ$.

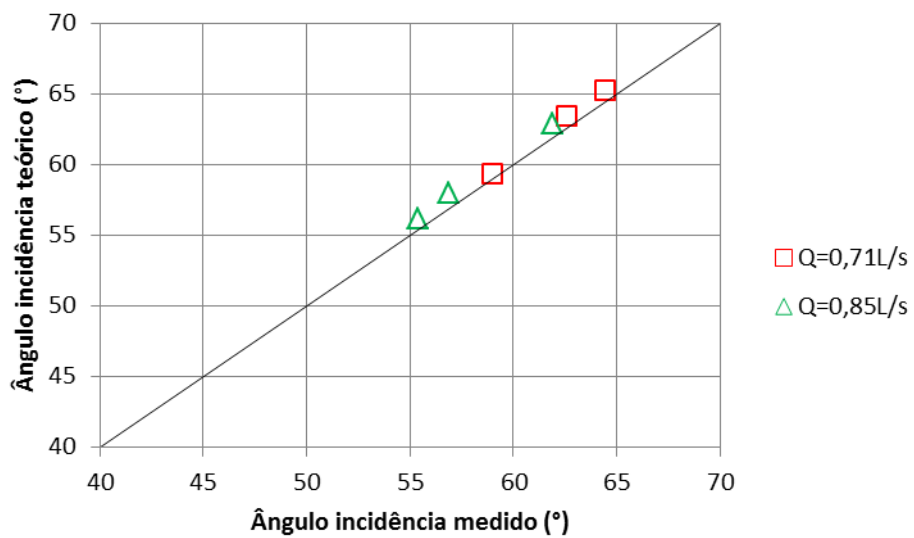


Figura D.2 - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 25^\circ$.

Quadro D.7 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 30^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	L_{medido} (cm)	L_t (cm)	α'_{medido} (°)	α'_t (°)
0,71	5	7,131	6,841	63,15	65,98
1,1	5	14,545	12,719	54,79	55,84

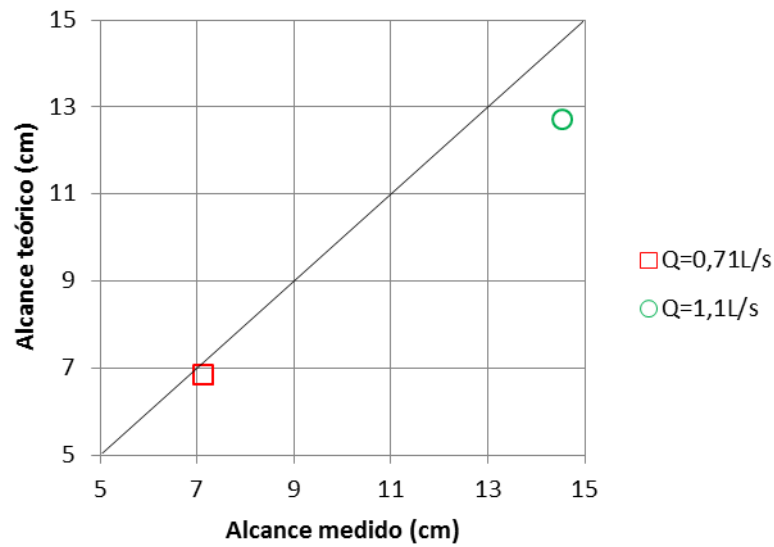


Figura D.3 - Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 30^\circ$.

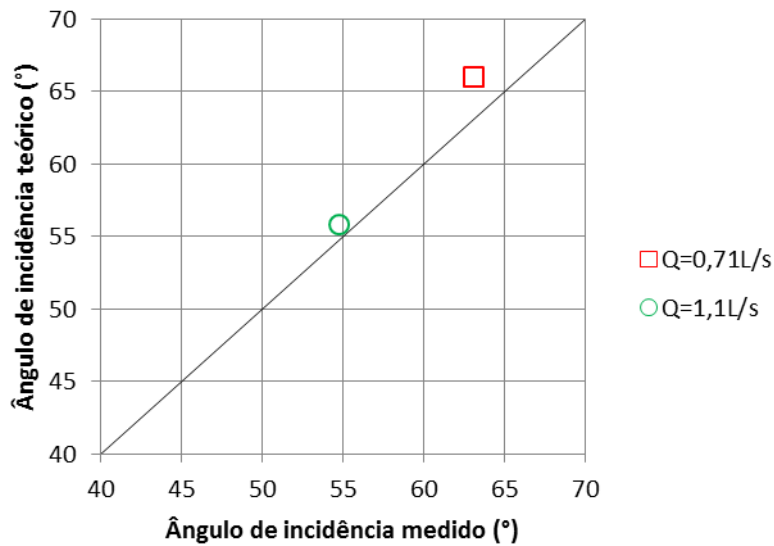


Figura D.4 - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 30^\circ$.

Quadro D.8 - Valores dos alcances e ângulos de incidência do jato, teóricos e medidos, para $\alpha = 45^\circ$.

Q (L/s)	h (m)	L_{medido} (cm)	L_t (cm)	α'_{medido} (°)	α'_t (°)
0,71	5	6,945	6,637	64,22	72,01
1,19	5	14,255	13,954	60,8	63,61

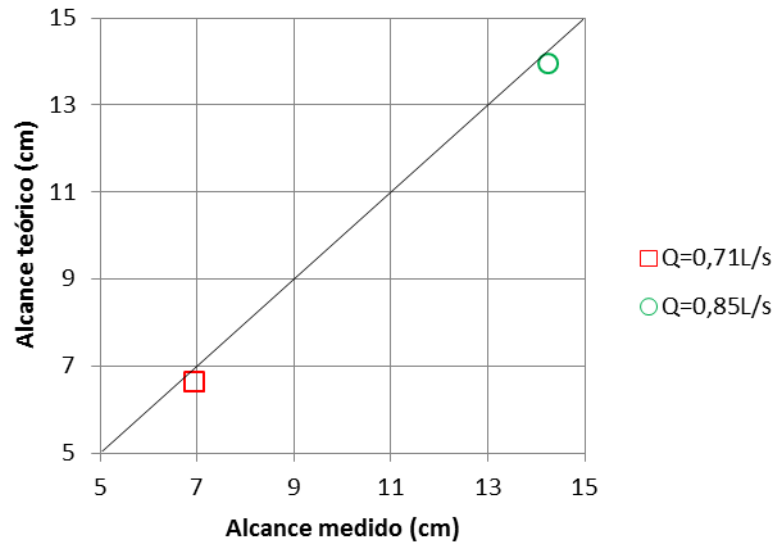


Figura D.5 – Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 45^\circ$.

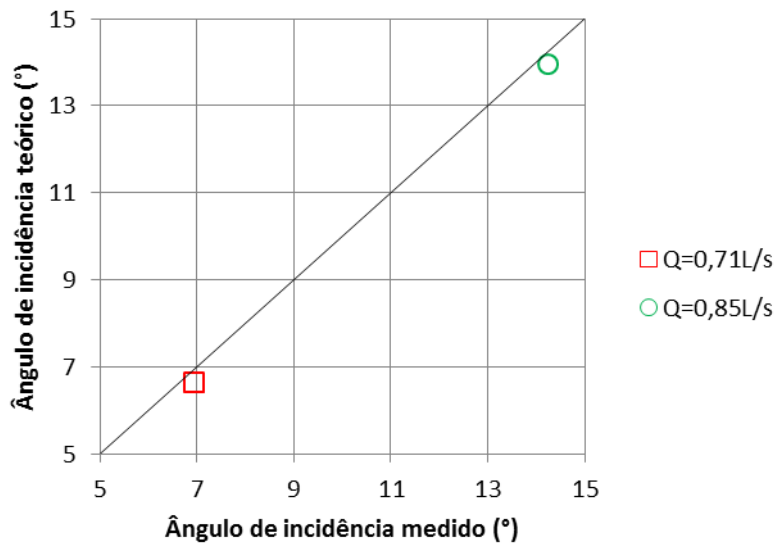


Figura D.6 - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência teóricos com os medidos através da TAI para $\alpha = 45^\circ$.

ANEXO E: PERFIS DE EROSÃO

E.1: LEVANTAMENTO DO PERFIL LONGITUDINAL

Quadro E.1 – Valores de f para $Q = 0,51$ L/s ($\alpha = 20^\circ$) (medidas em m).

x (m)	Q = 0,51 L/s		
	h = 1 cm	h = 3 cm	h = 5 cm
0	0,0395	0,0165	0,012
0,02	0,035	0,009	0,004
0,04	0,0455	0,014	0,0025
0,06	0,0575	0,03	0,007
0,08	0,066	0,046	0,02
0,1	0,069	0,057	0,037
0,12	0,07	0,058	0,0425
0,14	0,0695	0,0585	0,044
0,16	0,0665	0,0575	0,04304
0,18	0,062	0,0525	0,04148
0,2	0,053	0,047	0,0385
0,22	0,0405	0,041	0,033
0,24	0,0305	0,035	0,0265
0,26	0,0195	0,027	0,019
0,28	0,01	0,0115	0,009
0,3	0,0015	0,003	-0,002
0,32	-0,0035	-0,006	-0,0095
0,34	-0,004	-0,012	-0,014975
0,36	-0,0045	-0,0195	-0,024032
0,38	-0,005	-0,0245	-0,031
0,4	-0,0065	-0,025	-0,0345
0,42	-0,0075	-0,0275	-0,026
0,44	-0,008	-0,0285	-0,007
0,46	-0,0075	-0,0275	0
0,48	-0,0075	-0,027	0
0,5	-0,007	-0,0095	0
0,52	-0,0075	0	0
0,54	0	0	0

Quadro E.2 - Valores de f para $Q = 0,71$ L/s ($\alpha = 20^\circ$) (medidas em m).

x (m)	Q = 0,71 L/s		
	h = 1 cm	h = 3 cm	h = 5 cm
0	0,045	0,02	0,017
0,02	0,048	0,014	0,0125
0,04	0,0545	0,0115	0,0115
0,06	0,0595	0,0165	0,013
0,08	0,0625	0,028529	0,02
0,1	0,0675	0,0445	0,029
0,12	0,073	0,0525	0,0356
0,14	0,0755	0,064	0,045
0,16	0,0775	0,072	0,0535
0,18	0,0795	0,073	0,057
0,2	0,077	0,072	0,0605
0,22	0,0675	0,0705	0,06
0,24	0,06	0,067	0,0585
0,26	0,049	0,062971	0,058
0,28	0,036	0,058	0,0545
0,3	0,028	0,055	0,042
0,32	0,0225	0,0425	0,0375
0,34	0,013	0,0375	0,0315
0,36	0,006	0,0315	0,0255
0,38	0	0,021	0,019
0,4	-0,003	0,0155	0,00735
0,42	-0,005	-0,00047	-0,0002
0,44	-0,0055	-0,008	-0,00625
0,46	-0,0055	-0,0145	-0,0135
0,48	-0,0065	-0,02	-0,0215
0,5	-0,0065	-0,025	-0,027
0,52	-0,0065	-0,028	-0,03
0,54	-0,008	-0,0295	-0,0315
0,56	-0,0085	-0,03	-0,032
0,58	-0,0075	-0,03	-0,0225

0,6	-0,008	-0,029	-0,00525
0,62	-0,0085	-0,029	0
0,64	-0,009	-0,0235	0
0,66	-0,0095	-0,0085	0
0,68	-0,008	0	0
0,7	-0,001	0	0
0,72	0	0	0

Quadro E.3 - Valores de f para $Q = 0,85$ L/s ($\alpha = 20^\circ$) (medidas em m).

x (m)	Q = 0,85 L/s		
	h = 1 cm	h = 3 cm	h = 5 cm
0	0,085	0,0235	0,0165
0,02	0,0865	0,0245	0,008
0,04	0,085	0,023	0,0065
0,06	0,085	0,0295	0,0085
0,08	0,0845	0,046	0,009
0,1	0,0855	0,0595	0,023
0,12	0,085	0,067	0,0325
0,14	0,087	0,074	0,044
0,16	0,0905	0,079041	0,0535
0,18	0,092	0,080984	0,063
0,2	0,0935	0,0815	0,069
0,22	0,0915	0,082	0,07
0,24	0,0875	0,08	0,0705
0,26	0,084	0,0785	0,0695
0,28	0,078	0,076	0,0665
0,3	0,0695	0,071	0,063
0,32	0,0595	0,0635	0,06
0,34	0,0485	0,060025	0,0535
0,36	0,031	0,049468	0,047
0,38	0,024	0,043	0,041
0,4	0,0165	0,0355	0,0315
0,42	0,0085	0,029	0,0225
0,44	0,003	0,021	0,014
0,46	-0,0005	0,012	0,0025
0,48	-0,0035	0,004	-0,0035
0,5	-0,0035	-0,005	-0,0105
0,52	-0,0035	-0,01299	-0,0175
0,54	-0,004	-0,01655	-0,025
0,56	-0,006	-0,021	-0,028
0,58	-0,007	-0,023	-0,0325
0,6	-0,006	-0,0245	-0,0335
0,62	-0,006	-0,026	-0,0345

0,64	-0,0065	-0,0265	-0,035
0,66	-0,007	-0,028	-0,0245
0,68	-0,0075	-0,0285	-0,009
0,7	-0,007	-0,03001	0
0,72	-0,007	-0,0295	0
0,74	-0,0075	-0,0145	0
0,76	-0,008	0	0
0,78	-0,007	0	0
0,8	-0,007	0	0
0,82	-0,0065	0	0
0,84	-0,001	0	0
0,86	0	0	0

Quadro E.4 - Valores de f para $Q = 0,71$ L/s ($\alpha = 25^\circ$) (medidas em m).

x (m)	Q = 0,71 L/s		
	$h = 1$ cm	$h = 3$ cm	$h = 5$ cm
0	0,0575	0,042	0,027
0,02	0,0395	0,032	0,0265
0,04	0,0275	0,015	0,009
0,06	0,033	0,01	0,0035
0,08	0,042	0,019	0,018
0,1	0,0505	0,0315	0,0325
0,12	0,061	0,042	0,045
0,14	0,066	0,055	0,0545
0,16	0,0675	0,061	0,0595
0,18	0,0625	0,065	0,0605
0,2	0,0505	0,0645	0,0595
0,22	0,0395	0,0595	0,057
0,24	0,0285	0,052	0,0505
0,26	0,0185	0,045	0,043
0,28	0,009	0,032	0,0325
0,3	0	0,023	0,022
0,32	-0,005	0,015	0,015
0,34	-0,0075	0,008	0,001
0,36	-0,0075	-0,0015	-0,009
0,38	-0,008	-0,012	-0,016
0,4	-0,0085	-0,018	-0,0205
0,42	-0,009	-0,021	-0,026
0,44	-0,0095	-0,024	-0,0305
0,46	-0,0095	-0,0245	-0,035
0,48	-0,0095	-0,026	-0,0345
0,5	-0,009	-0,026	-0,026
0,52	-0,0095	-0,0265	-0,008
0,54	-0,0095	-0,0245	0
0,56	-0,0095	-0,014	0
0,58	-0,0095	0	0
0,6	-0,01	0	0
0,62	-0,01	0	0

0,64	-0,01	0	0
0,66	-0,0085	0	0
0,68	-0,002	0	0
0,7	0	0	0

Quadro E.5 - Valores de f para $Q = 0,85$ L/s ($\alpha = 25^\circ$) (medidas em m).

x (m)	Q = 0,85 L/s		
	h = 1 cm	h = 3 cm	h = 5 cm
0	0,0725	0,049	0,0325
0,02	0,061	0,051	0,0195
0,04	0,0455	0,043	0,003
0,06	0,0405	0,0345	0,0075
0,08	0,0535	0,0365	0,0245
0,1	0,0625	0,052	0,035
0,12	0,067	0,061	0,0435
0,14	0,0705	0,0675	0,052
0,16	0,0725	0,0705	0,064
0,18	0,0735	0,071	0,0675
0,2	0,0705	0,07	0,0685
0,22	0,064	0,068	0,069
0,24	0,051	0,064	0,0675
0,26	0,039	0,0595	0,0645
0,28	0,0275	0,0495	0,057
0,3	0,0185	0,0375	0,0495
0,32	0,011	0,0285	0,0425
0,34	0,0035	0,019	0,033
0,36	-0,0025	0,0085	0,022
0,38	-0,0065	-0,001	0,015
0,4	-0,0075	-0,0095	0,007
0,42	-0,008	-0,014	-0,004
0,44	-0,0085	-0,0205	-0,0105
0,46	-0,009	-0,024	-0,0165
0,48	-0,009	-0,0265	-0,0255
0,5	-0,0095	-0,0275	-0,031
0,52	-0,0095	-0,0285	-0,033
0,54	-0,0095	-0,029	-0,0355
0,56	-0,0095	-0,029	-0,0375
0,58	-0,009	-0,029	-0,037
0,6	-0,0095	-0,0295	-0,023
0,62	-0,0095	-0,029	-0,004

0,64	-0,01	-0,0235	0
0,66	-0,01	-0,013	0
0,68	-0,0095	0	0
0,7	-0,0095	0	0
0,72	-0,01	0	0
0,74	-0,01	0	0
0,76	-0,01	0	0
0,78	-0,0095	0	0
0,8	-0,0095	0	0
0,82	-0,006	0	0
0,84	0	0	0
0,86			

Quadro E.6 - Valores de f para $\alpha = 30^\circ$ (medidas em m).

x (m)	Q = 0,71 L/s	Q = 1,1 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
0	0,022	0,027
0,02	0,025	0,026
0,04	0,0175	0,007
0,06	0,025	0,01
0,08	0,0355	0,021
0,1	0,048	0,0275
0,12	0,0555	0,032
0,14	0,0605	0,0355
0,16	0,06	0,0425
0,18	0,055	0,0515
0,2	0,049	0,0625
0,22	0,0395	0,0685
0,24	0,027	0,071
0,26	0,0135	0,0725
0,28	-0,0015	0,0705
0,3	-0,012	0,067
0,32	-0,0215	0,061
0,34	-0,0275	0,0535
0,36	-0,035	0,044
0,38	-0,038	0,038
0,4	-0,0385	0,032
0,42	-0,029	0,0225
0,44	-0,015	0,014
0,46	-0,001	0,0055
0,48	0	-0,005
0,5	0	-0,0125
0,52	0	-0,018
0,54	0	-0,0265
0,56	0	-0,0315
0,58	0	-0,036
0,6	0	-0,038
0,62	0	-0,0405

0,64	0	-0,037
0,66	0	-0,0235
0,68	0	0

Quadro E.7 - Valores de f para $\alpha = 45^\circ$ (medidas em m).

x (m)	Q = 0,71 L/s	Q = 1,19 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
0	0,019	0,0285
0,02	0,0265	0,0225
0,04	0,02	0,0055
0,06	0,03	0,013
0,08	0,0415	0,022
0,1	0,054	0,0325
0,12	0,0605	0,042
0,14	0,0615	0,048
0,16	0,057	0,0525
0,18	0,05	0,058
0,2	0,0435	0,0625
0,22	0,0295	0,0645
0,24	0,013	0,0665
0,26	0,0025	0,0675
0,28	-0,01	0,066
0,3	-0,0185	0,0625
0,32	-0,028	0,0585
0,34	-0,0345	0,0525
0,36	-0,038	0,0435
0,38	-0,0375	0,0345
0,4	-0,026	0,029
0,42	-0,016	0,0195
0,44	0	0,014
0,46	0	0,003
0,48	0	-0,004
0,5	0	-0,0115
0,52	0	-0,0195
0,54	0	-0,023
0,56	0	-0,031
0,58	0	-0,033
0,6	0	-0,0375
0,62	0	-0,039

0,64	0	-0,0415
0,66	0	-0,04
0,68	0	-0,029
0,7	0	-0,0145
0,72	0	0

E.2: INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO COLCHÃO DE ÁGUA

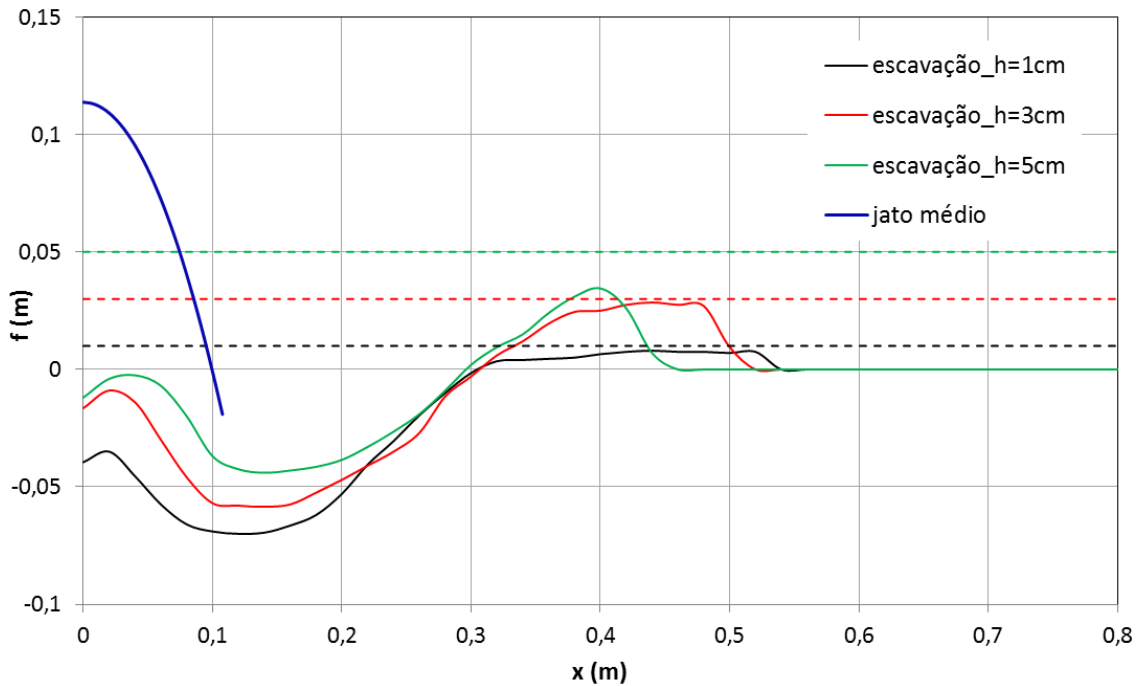


Figura E.1 – Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha = 20^\circ$ e $Q = 0,51 \text{ L/s}$.

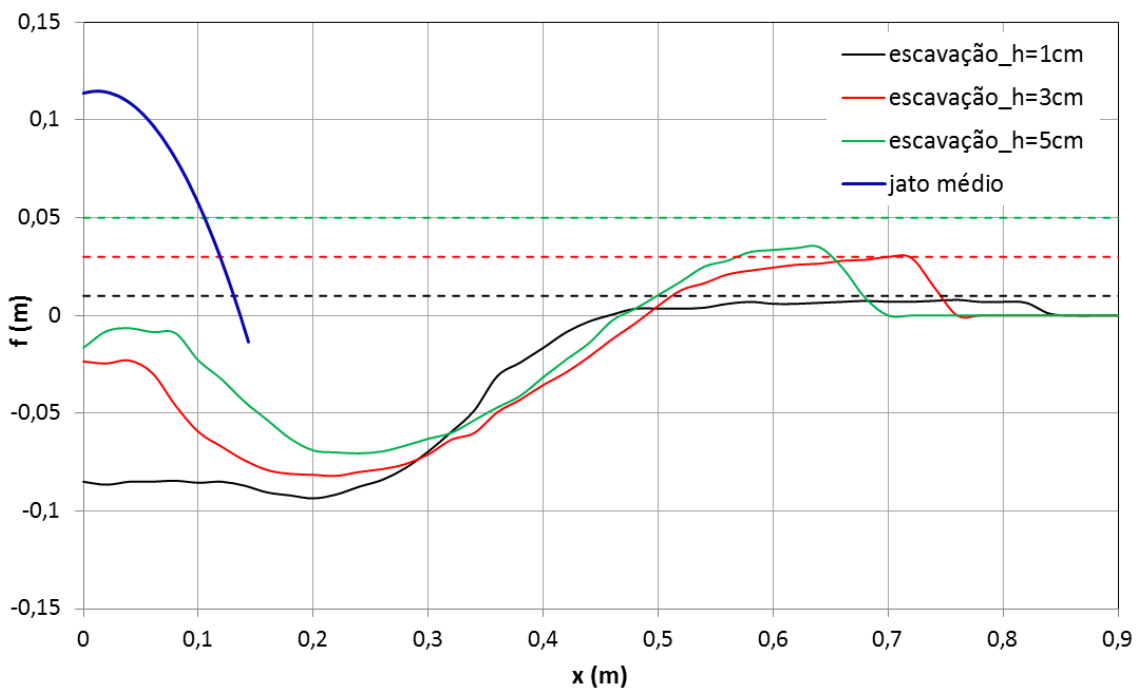


Figura E.2 – Representação gráfica dos perfis de erosão e do jato médio para a condição $\alpha = 20^\circ$ e $Q = 0,85 \text{ L/s}$.

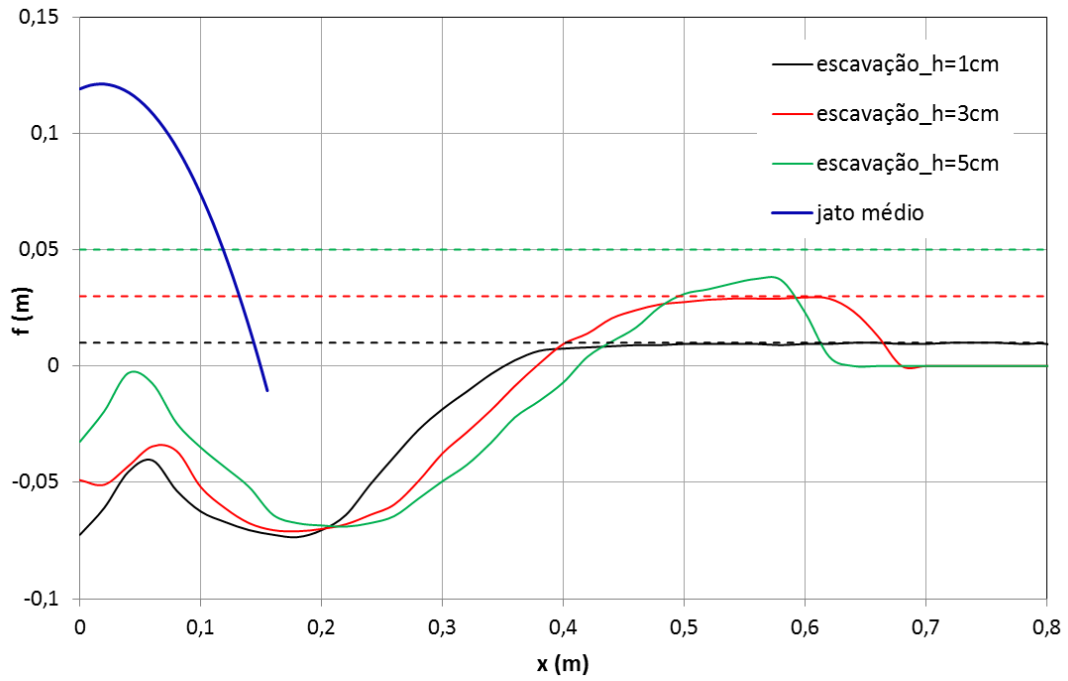


Figura E.3 – Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha = 25^\circ$ e $Q = 0,85$ L/s.

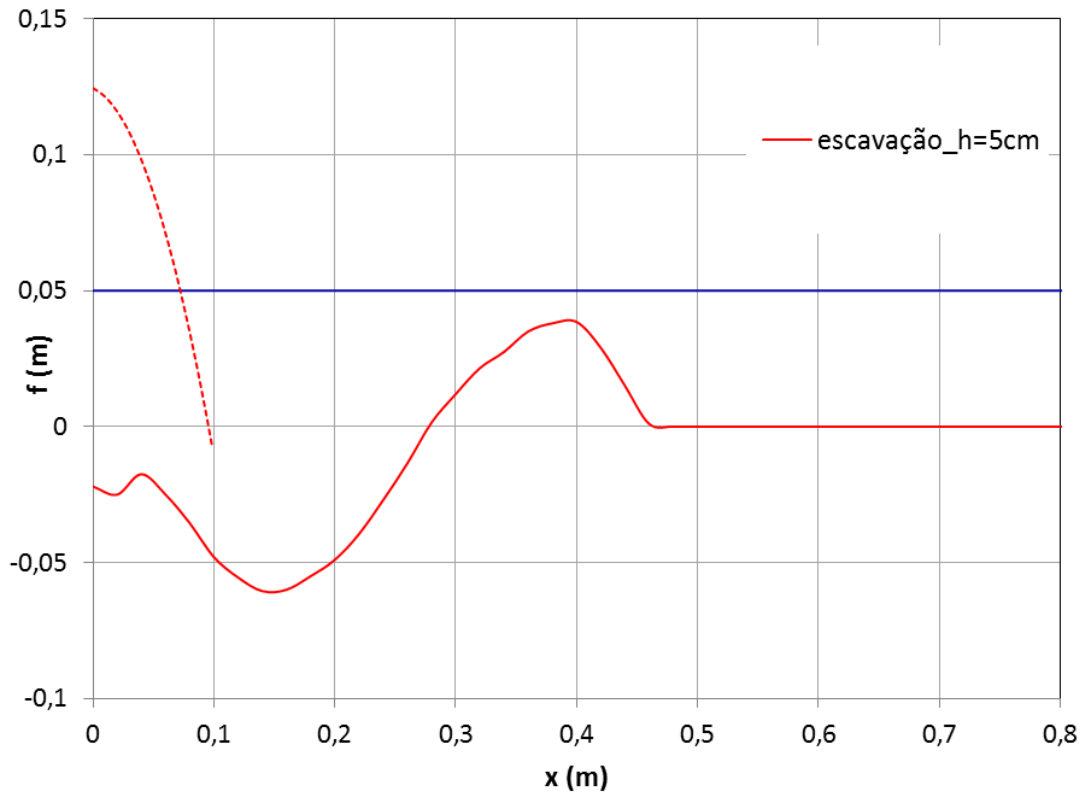


Figura E.4 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha = 30^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s.

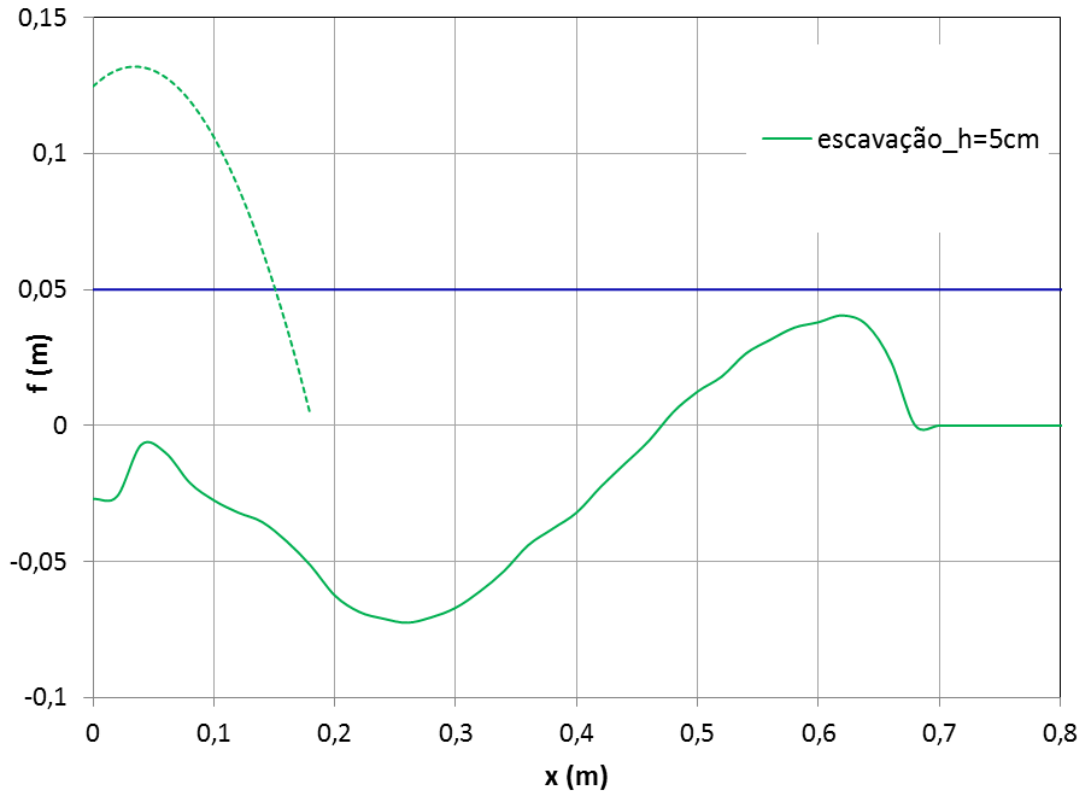


Figura E.5 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha = 30^\circ$ e $Q = 1,1$ L/s.

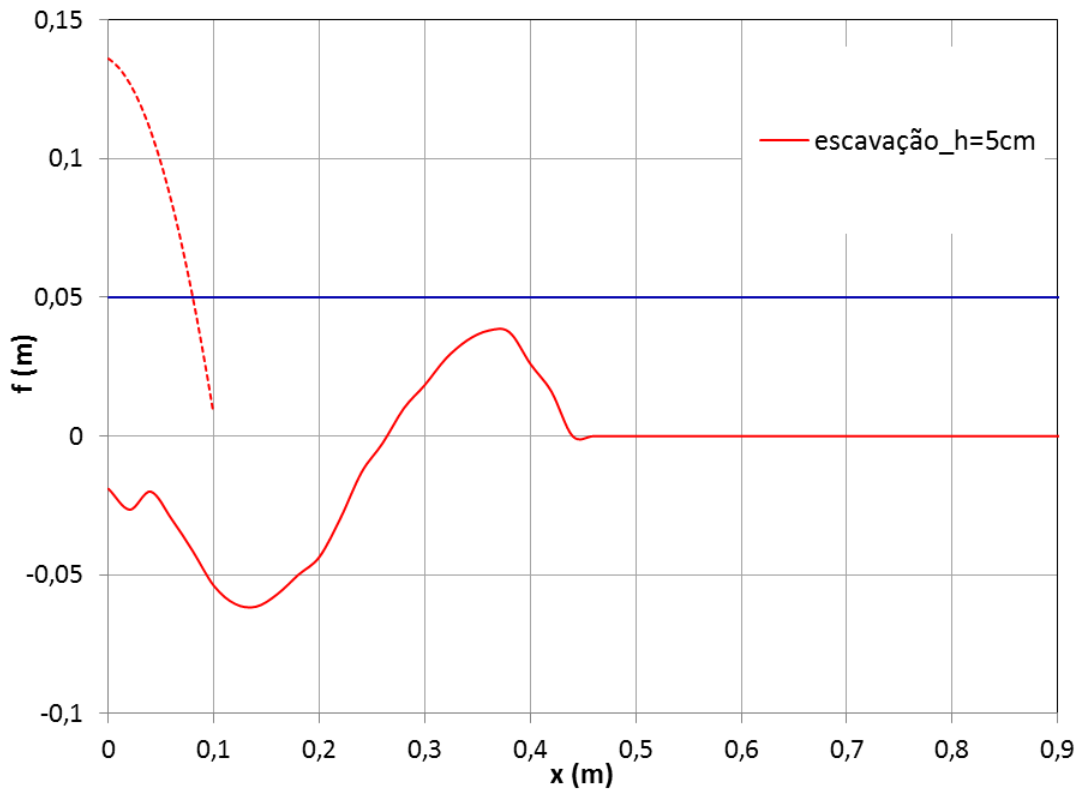


Figura E.6 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha = 45^\circ$ e $Q = 0,71$ L/s.

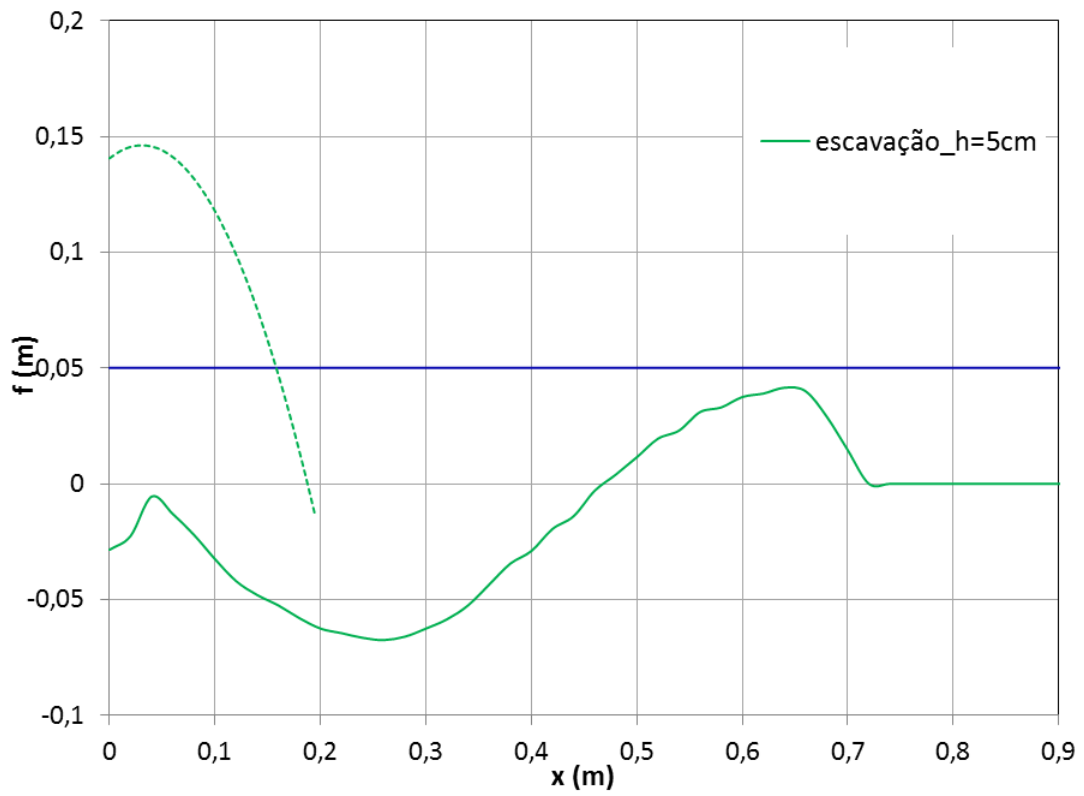


Figura E.7 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para a condição $\alpha = 45^\circ$ e $Q = 1,19 \text{ L/s}$

E.3: INFLUÊNCIA DO CAUDAL

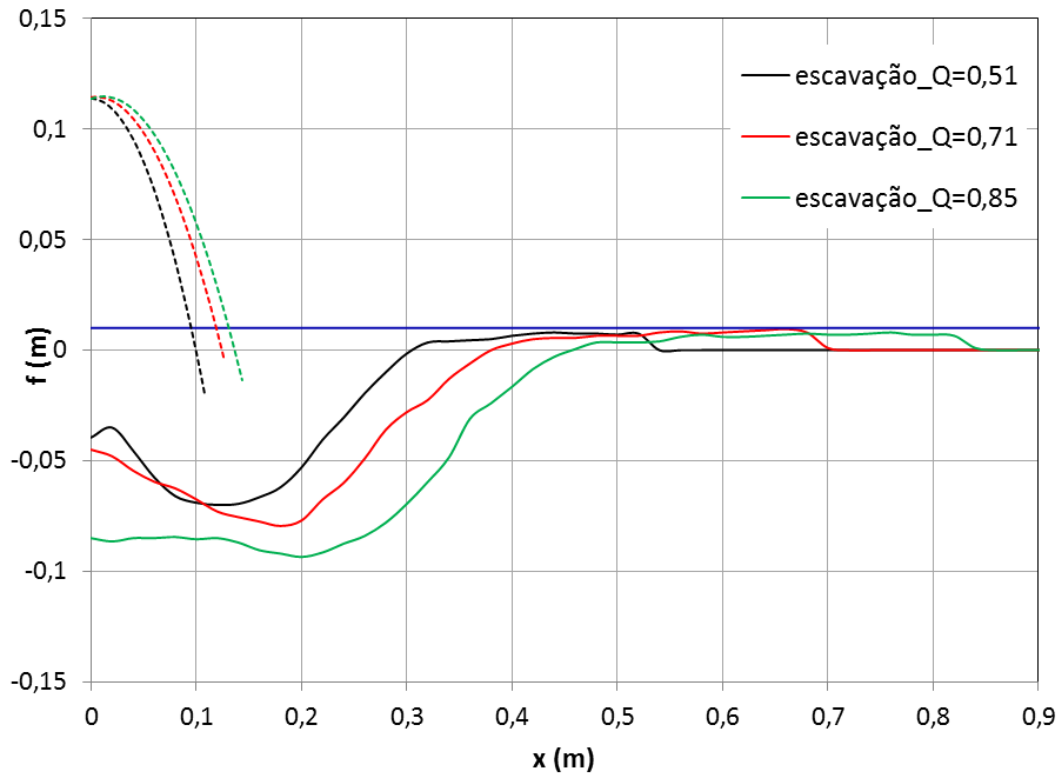


Figura E.8 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h = 1$ cm e $\alpha = 20^\circ$.

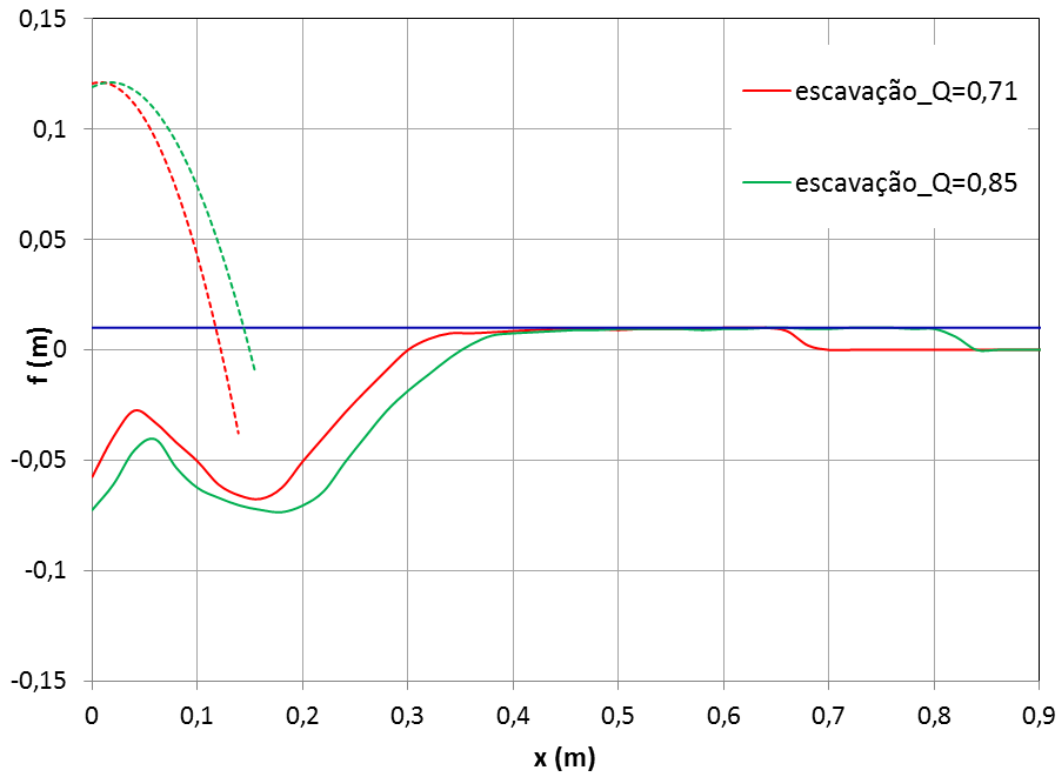


Figura E.9 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h = 1$ cm e $\alpha = 25^\circ$.

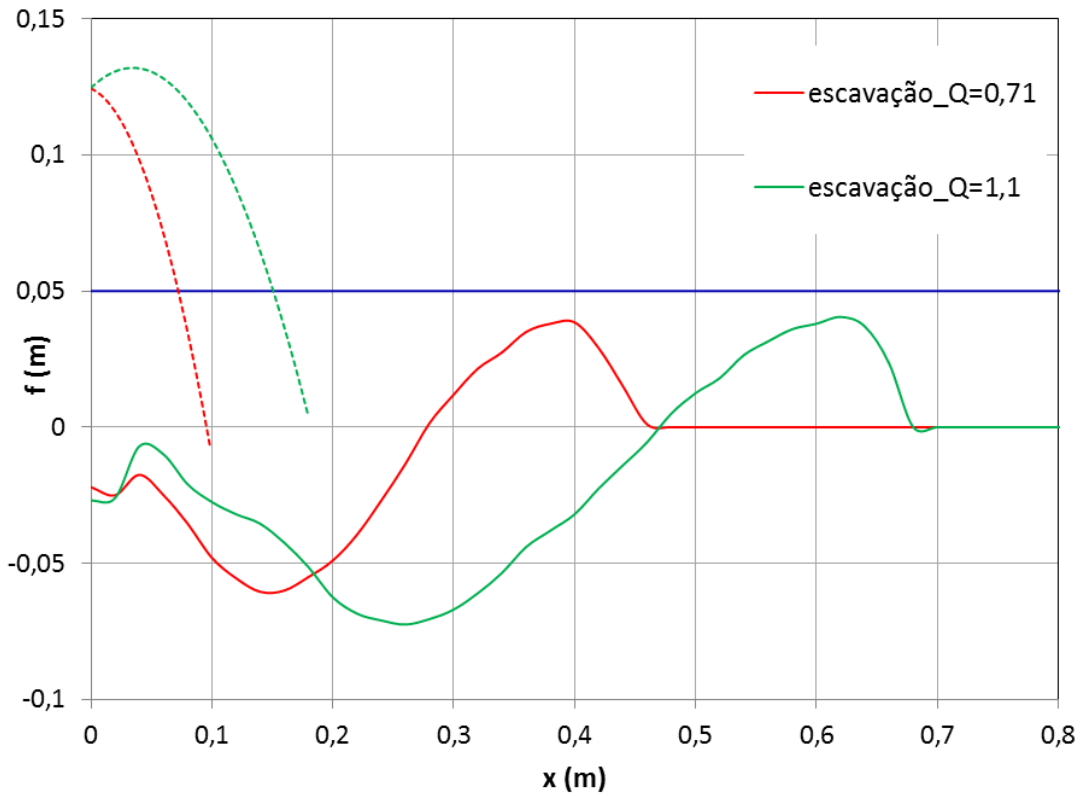


Figura E.10 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h = 5 \text{ cm}$ e $\alpha = 30^\circ$.

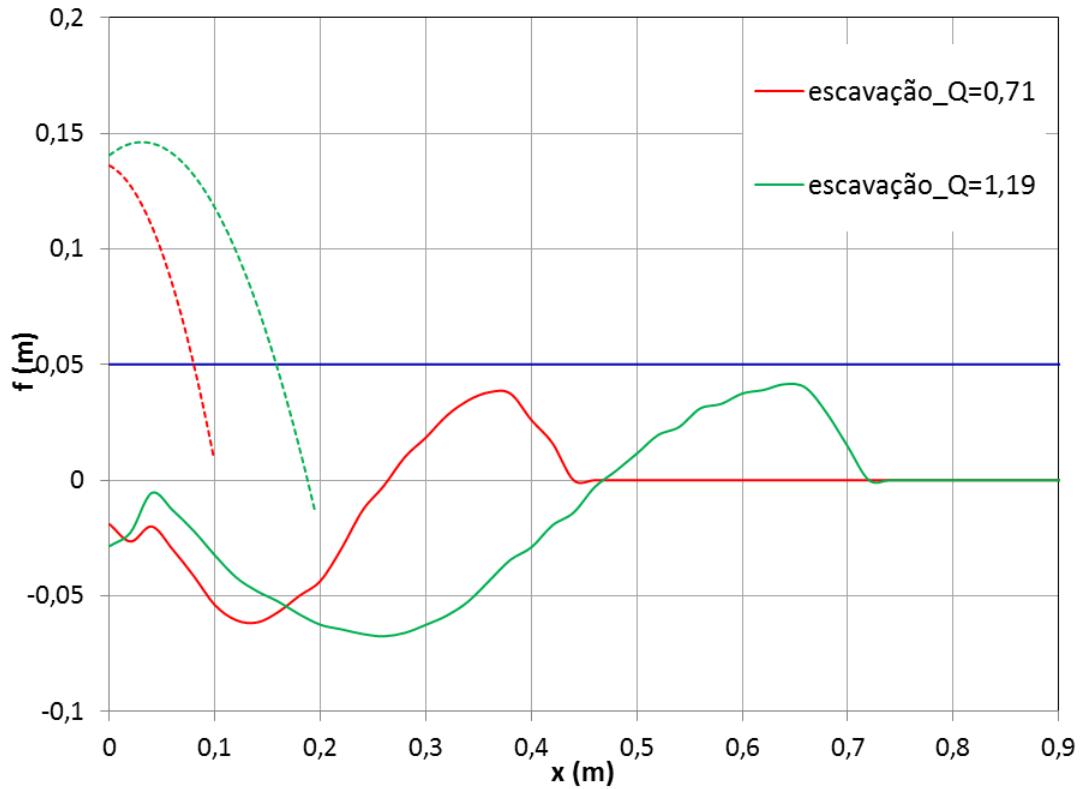


Figura E.11 - Representação gráfica dos perfis de erosão e dos jatos médios para $h = 5 \text{ cm}$ e $\alpha = 45^\circ$.

ANEXO F: PROFUNDIDADE MÁXIMA

F.1: VARIÁVEIS NECESSÁRIAS PARA APLICAÇÃO DAS EXPRESSÕES

Quadro F.1 - Valores dos caudais descarregados.

Q_{modelo} (L/s)	$Q_{protótipo}$ (m ³ /s)	q_{modelo} (m ² /s)	$q_{protótipo}$ (m ² /s)
0,51	5,1608	0,0102	2,5804
0,71	7,1847	0,0142	3,5924
0,85	8,6014	0,017	4,3007
1,1	11,2168	0,022	5,6084
1,19	12,0888	0,0238	6,044

Quadro F.2 – Valores da altura de queda para $\alpha = 20^\circ$.

Q_{modelo} (L/s)	h_{modelo} (m)	$h_{protótipo}$ (m)	H_{modelo} (m)	$H_{protótipo}$ (m)
0,51	0,01	0,4	0,1089	4,356
	0,03	1,2	0,0906	3,624
	0,05	2	0,0717	2,868
0,71	0,01	0,4	0,1182	4,728
	0,03	1,2	0,1001	4,004
	0,05	2	0,0790	3,160
0,85	0,01	0,4	0,1258	5,032
	0,03	1,2	0,1051	4,204
	0,05	2	0,0855	3,420

Quadro F.3 - Valores da altura de queda para $\alpha = 25^\circ$.

Q_{modelo} (L/s)	h_{modelo} (m)	$h_{protótipo}$ (m)	H_{modelo} (m)	$H_{protótipo}$ (m)
0,71	0,01	0,4	0,1182	4,728
	0,03	1,2	0,1001	4,004
	0,05	2	0,0790	3,160
0,85	0,01	0,4	0,1258	5,032
	0,03	1,2	0,1051	4,204
	0,05	2	0,0855	3,420

Quadro F.4 - Valores da altura de queda para $\alpha = 30^\circ$.

Q_{modelo} (L/s)	h_{modelo} (m)	$h_{protótipo}$ (m)	H_{modelo} (m)	$H_{protótipo}$ (m)
0,71	0,01	0,4	0,1182	4,728
1,1	0,01	0,4	0,1258	5,032

Quadro F.5 - Valores da altura de queda para $\alpha = 35^\circ$.

Q_{modelo} (L/s)	h_{modelo} (m)	$h_{protótipo}$ (m)	H_{modelo} (m)	$H_{protótipo}$ (m)
0,71	0,01	0,4	0,1182	4,728
1,1	0,01	0,4	0,1258	5,032

Quadro F.6 – Dimensões características do material granular utilizado.

$d_{m-modelo}$ (m)	$d_{m-protótipo}$ (m)	$d_{85-modelo}$ (m)	$d_{85-protótipo}$ (m)	$d_{90-modelo}$ (m)	$d_{90-protótipo}$ (m)
0,000992	0,03968	0,00175	0,07	0,001855	0,0742

Quadro F.7 – Valores do raio do trampolim para os diferentes ângulos de saída.

α (°)	R_{modelo} (m)	$R_{protótipo}$ (m)
20	0,14619	5,8476
25	0,11831	4,7324
30	0,1	4
45	0,07071	2,8284

F.2: CÁLCULO DAS PROFUNDIDADES MÁXIMAS

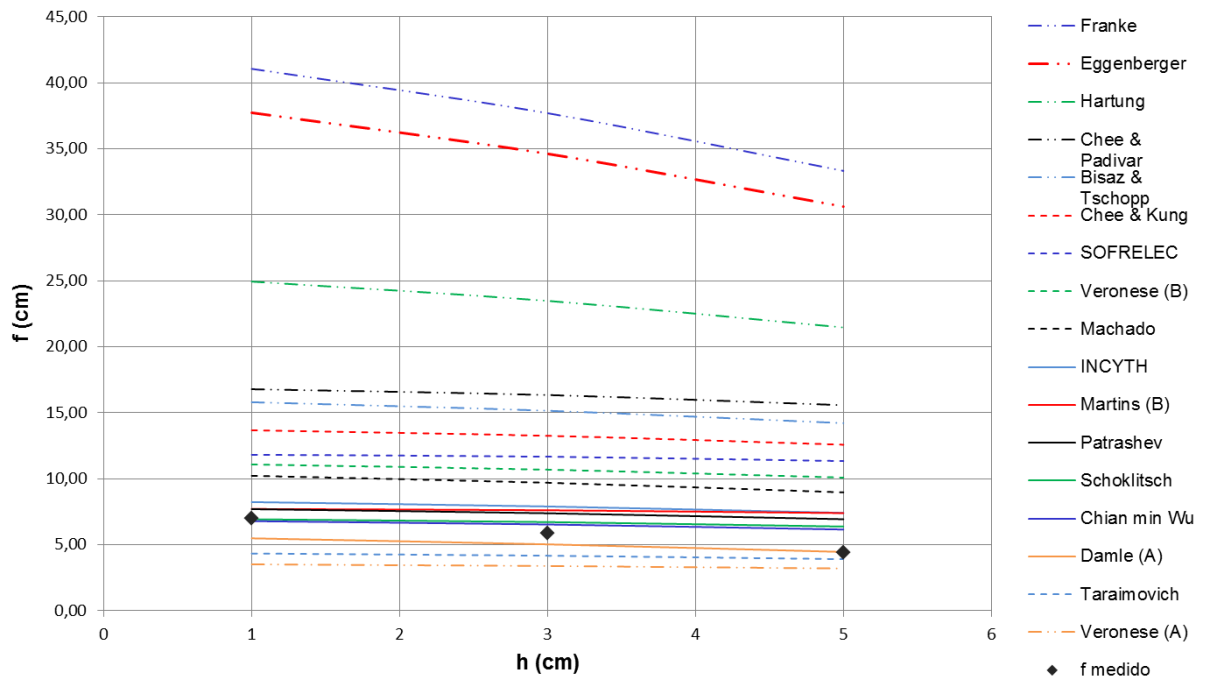


Figura F.1 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q = 0,51$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

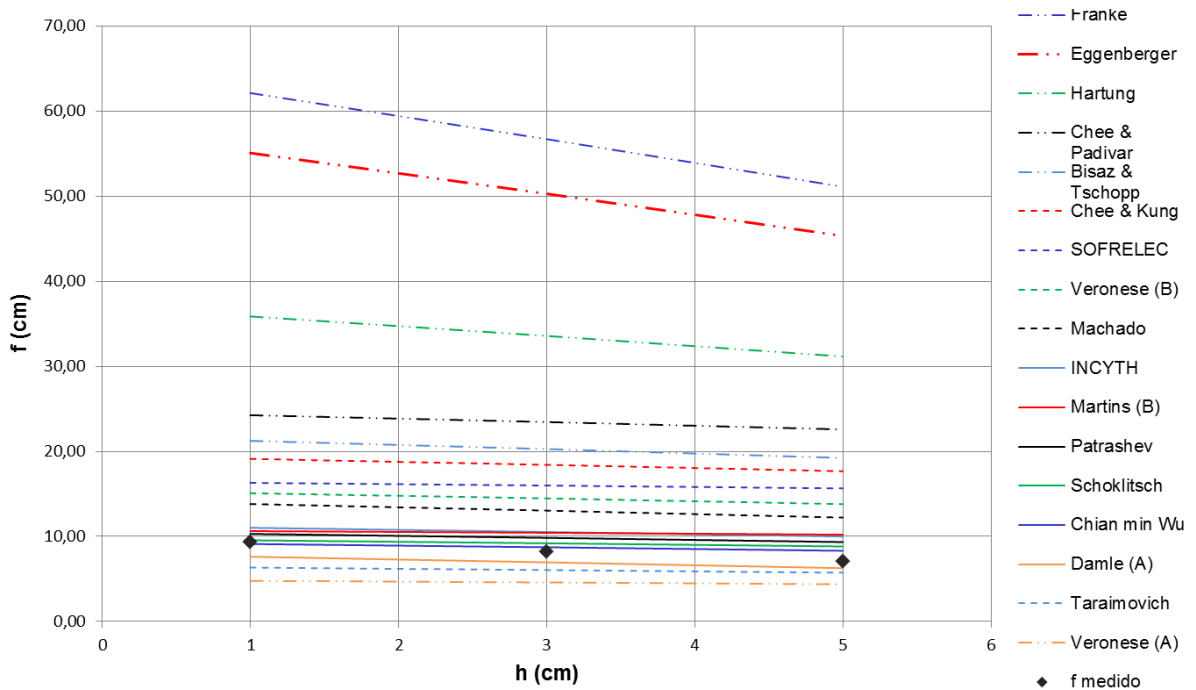


Figura F.2 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q = 0,85$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

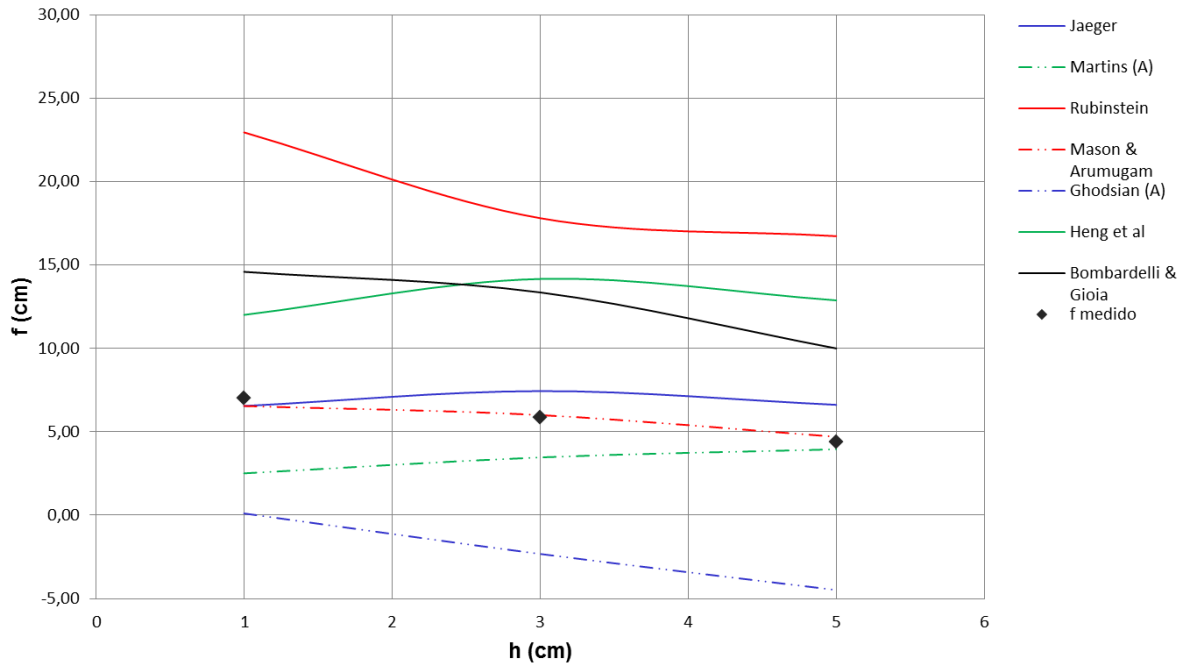


Figura F.3 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q = 0,51$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

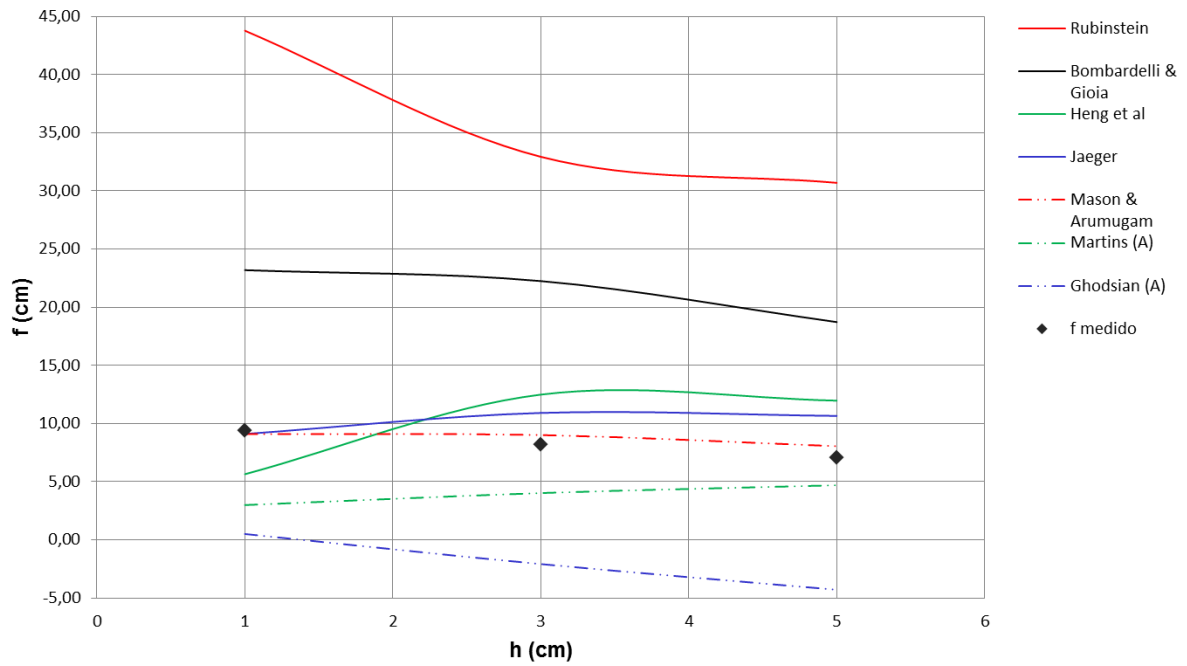


Figura F.4 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q = 0,85$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

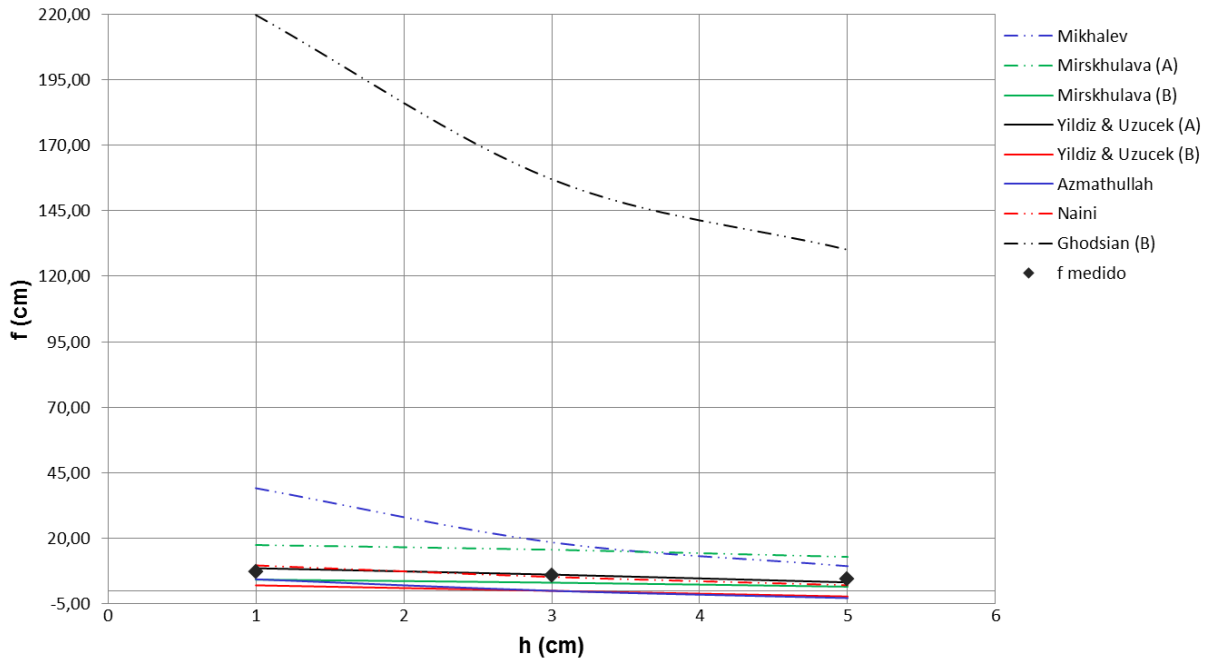


Figura F.5 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q = 0,51$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

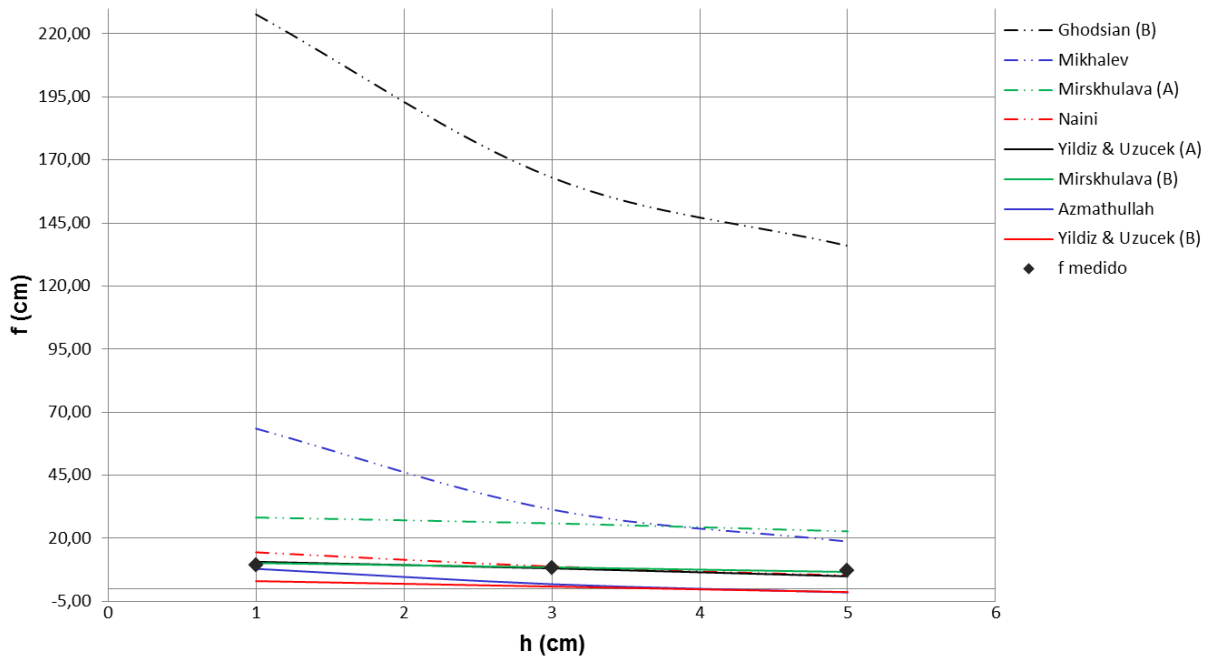


Figura F.6 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q = 0,85$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

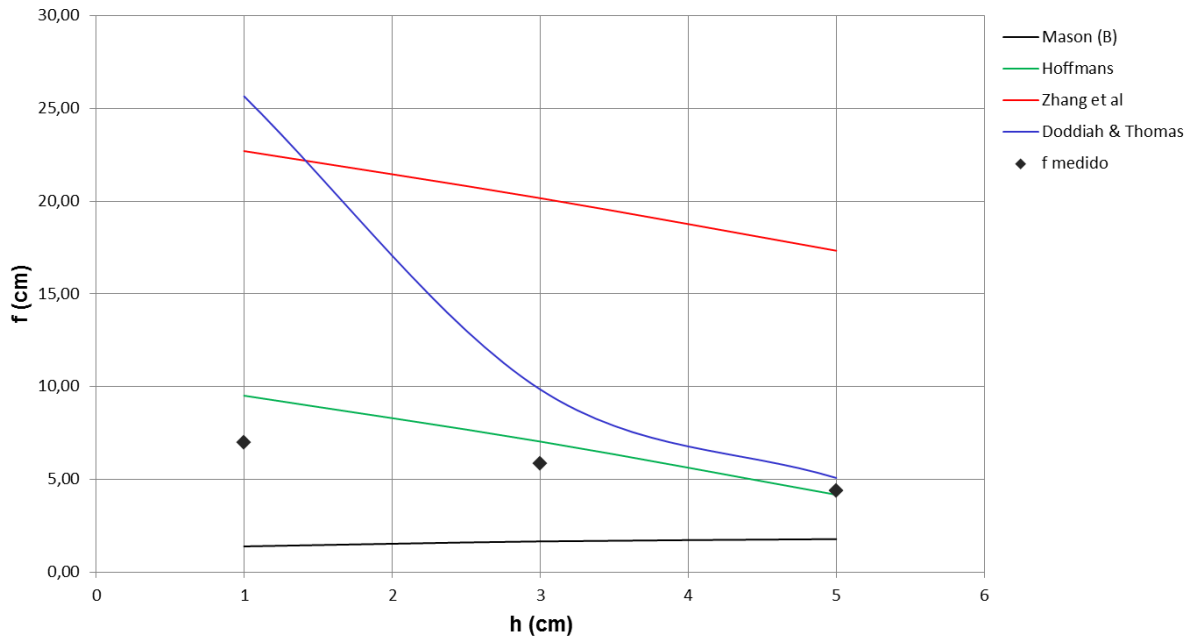


Figura F.7 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q = 0,51$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

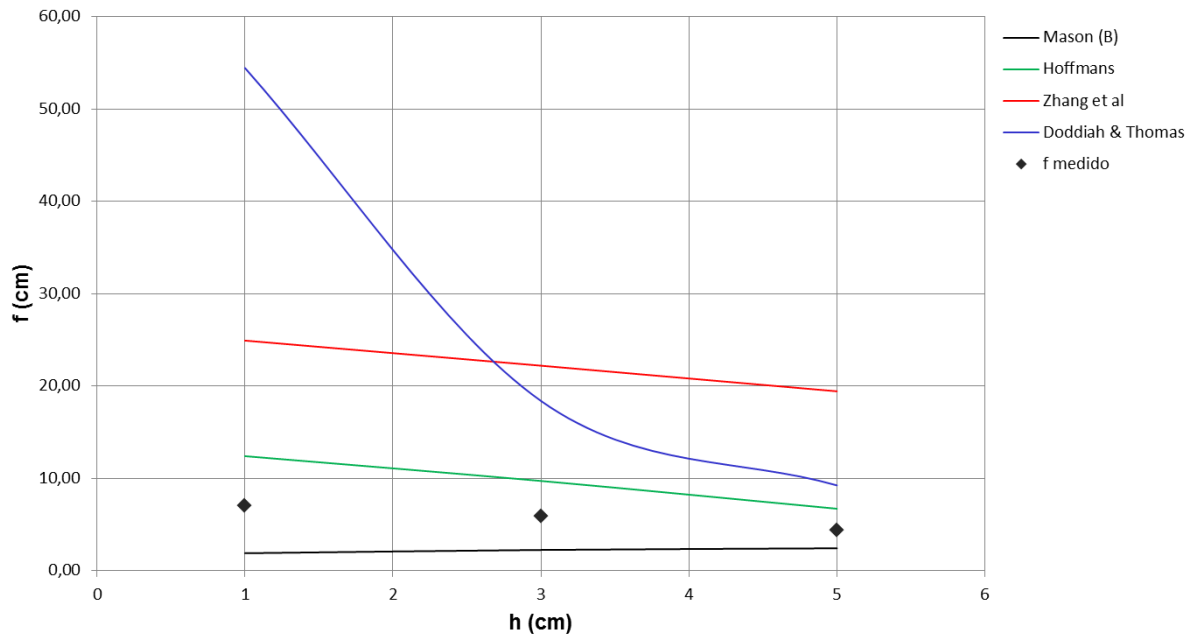


Figura F.8 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q = 0,85$ L/s e $\alpha = 20^\circ$).

Quadro F.8 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo I (medidas em cm).

Autor	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
Schoklitsch (1935)	8,46	8,08	7,78	9,48	9,22	8,77
Patrashev (1937)	9,20	8,70	8,28	10,21	9,87	9,27
Veronese (A) (1937)	4,25	4,04	3,87	4,75	4,60	4,35
Veronese (B) (1937)	13,41	12,75	12,20	14,97	14,51	13,72
Eggenburger (1944)	47,34	42,22	38,27	54,22	50,62	44,65
Hartung (1959)	31,13	28,68	26,74	35,46	33,74	30,83
Franke (1960)	52,72	47,03	42,63	61,15	57,09	50,35
Damle (A) (1966)	6,66	5,94	5,38	7,49	6,99	6,17
Bisaz e Tschopp (1972)	18,96	17,90	17,03	21,07	20,34	19,09
Chian Min Wu (1973)	8,14	7,72	7,37	9,04	8,75	8,25
Chee & Kung (1974)	16,85	16,11	15,50	18,99	18,47	17,57
Chee & Padivar (1969)	21,14	20,31	19,63	24,11	23,51	22,48
Martins (B) (1984)	9,44	9,24	9,07	10,59	10,44	10,18
Taraimovich (1978)	5,49	5,19	4,94	6,28	6,06	5,70
Machado (1980)	12,28	11,43	10,75	13,67	13,09	12,10
SOFRELEC (1985)	14,48	14,17	13,91	16,23	16,00	15,61
INCYTH (1985)	9,84	9,30	8,86	10,92	10,55	9,91

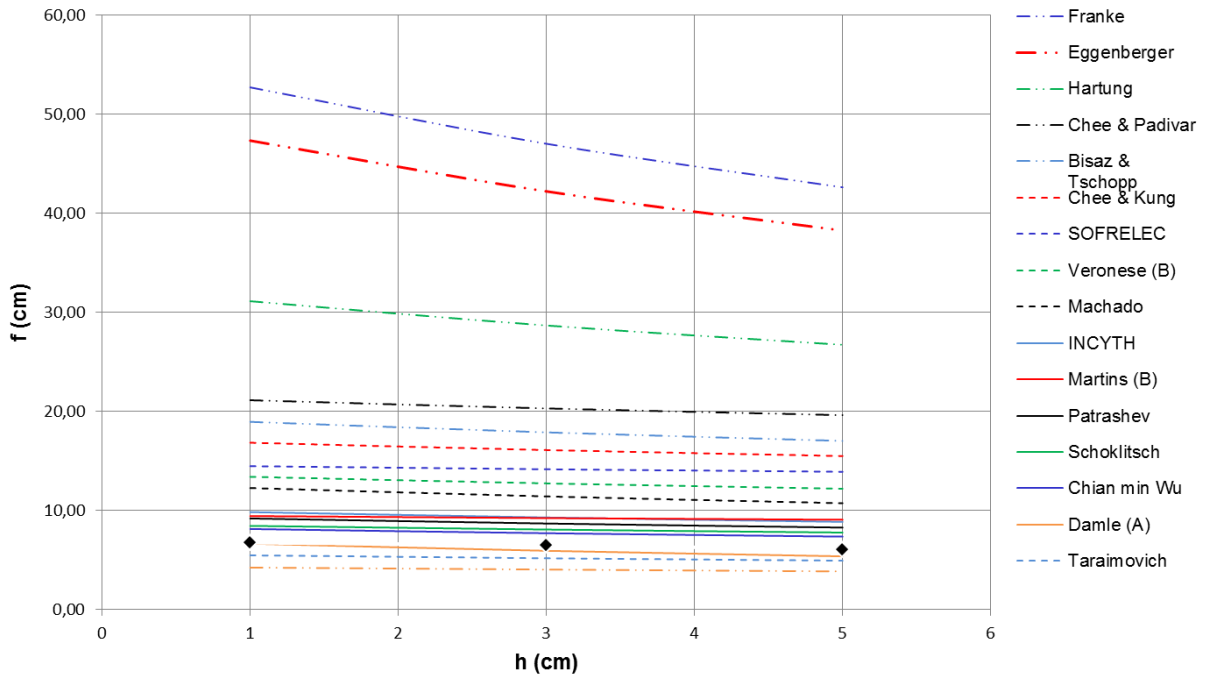


Figura F.9 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $\alpha = 25^\circ$).

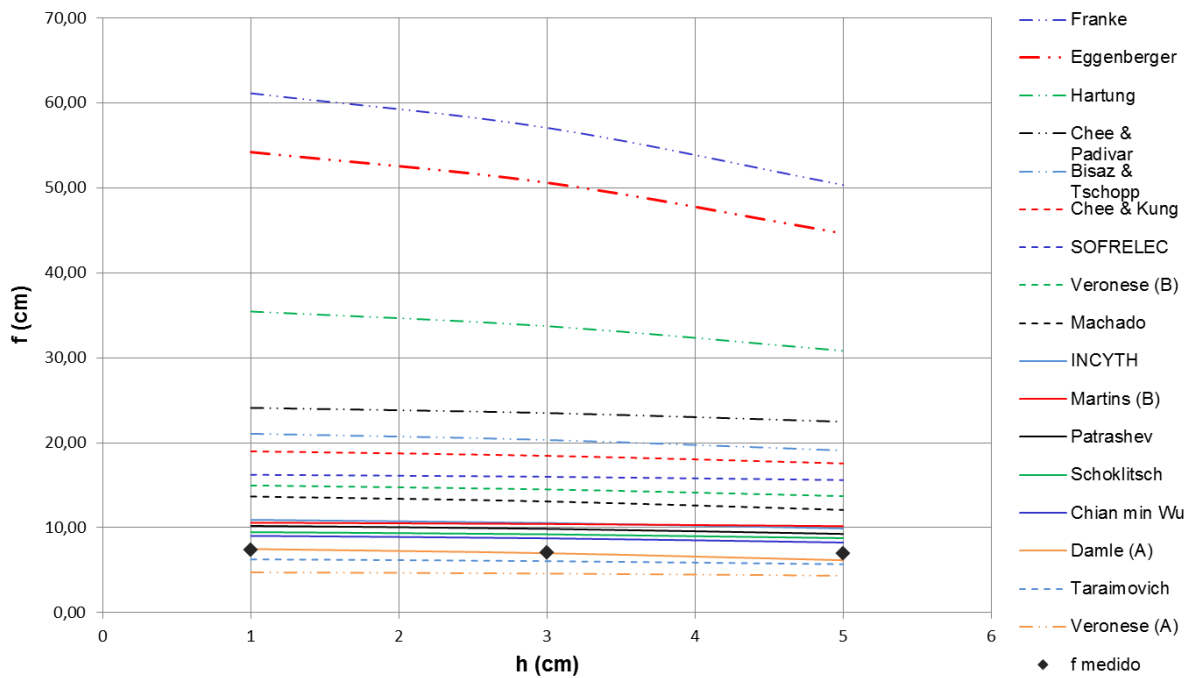


Figura F.10 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo I ($Q = 0,85 \text{ L/s}$ e $\alpha = 25^\circ$).

Quadro F.9 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo II (medidas em cm).

Autor	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
Jaeger (1939)	8,02	9,29	8,88	9,01	10,95	10,53
Martins (A) (1984)	2,80	3,80	4,42	2,98	4,01	4,68
Rubinstein (1963)	34,49	26,22	24,92	43,40	32,96	30,75
Mason & Arumugam (1985)	8,11	7,87	6,80	9,10	8,99	8,07
Ghodsian(A) (1999)	0,33	-2,20	-4,38	0,48	-2,08	-4,30
Heng et al. (2013)	8,47	13,22	12,35	5,66	12,48	11,96
Bombardelli & Gioia (2006)	19,22	17,44	14,34	22,66	22,45	18,22

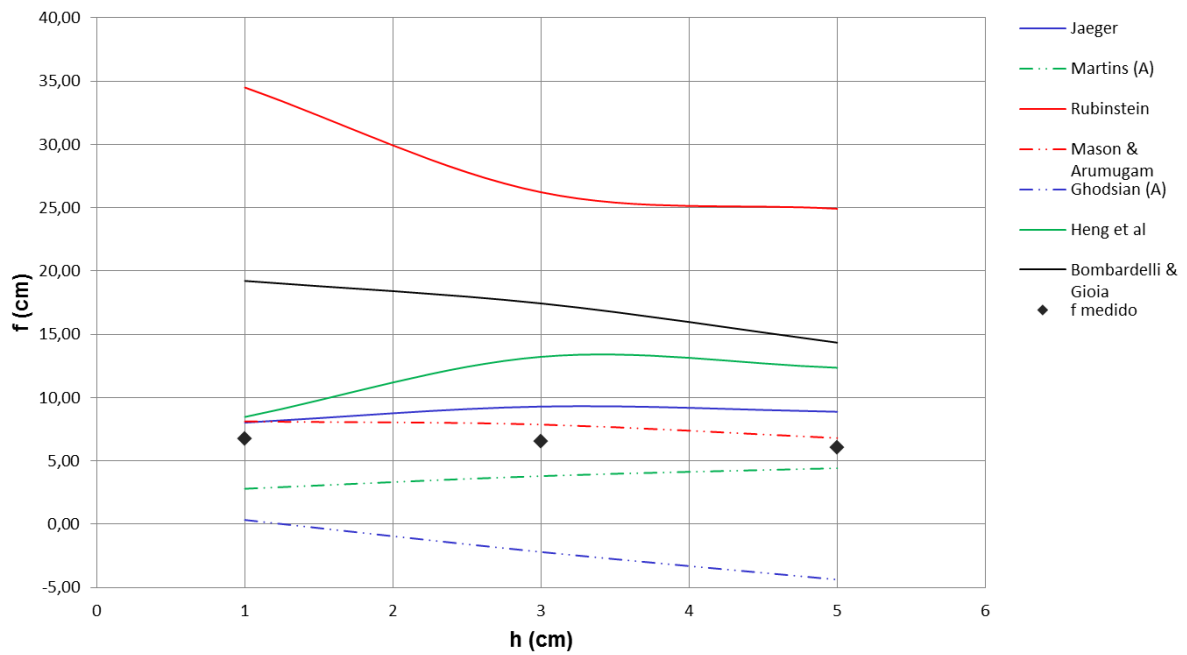


Figura F.11 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q = 0,71$ L/s e $\alpha = 25^\circ$).

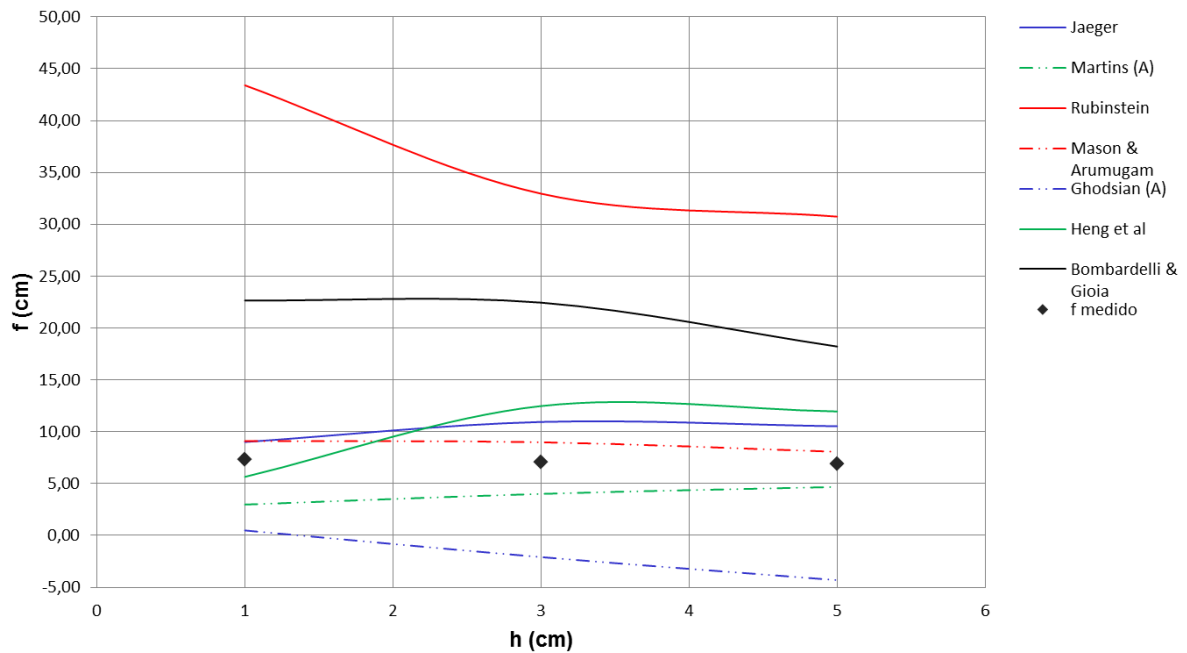


Figura F.12 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo II ($Q = 0,85 \text{ L/s}$ e $\alpha = 25^\circ$).

Quadro F.10 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo III (medidas em cm).

Autor	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
Mikhalev (1960)	54,69	26,53	15,21	65,78	32,76	19,40
Mirskhulava (A) (1967)	24,50	22,36	19,52	29,56	27,32	23,87
Mirskhulava (B) (1967)	7,53	5,24	4,2	10,22	9,18	6,82
Yildiz & Uzucek (A) (1994)	10,39	7,80	4,78	11,62	9,05	5,66
Yildiz & Uzucek (B) (1996)	3,47	1,25	-0,93	4,00	1,84	-0,42
Azmathullah et al. (2004)	7,12	1,39	-1,72	8,77	2,31	-1,06
Naini (2011)	12,44	7,26	3,95	14,38	8,86	5,26
Ghodsian (B) (2012)	182,51	129,54	107,99	184,95	133,35	110,35

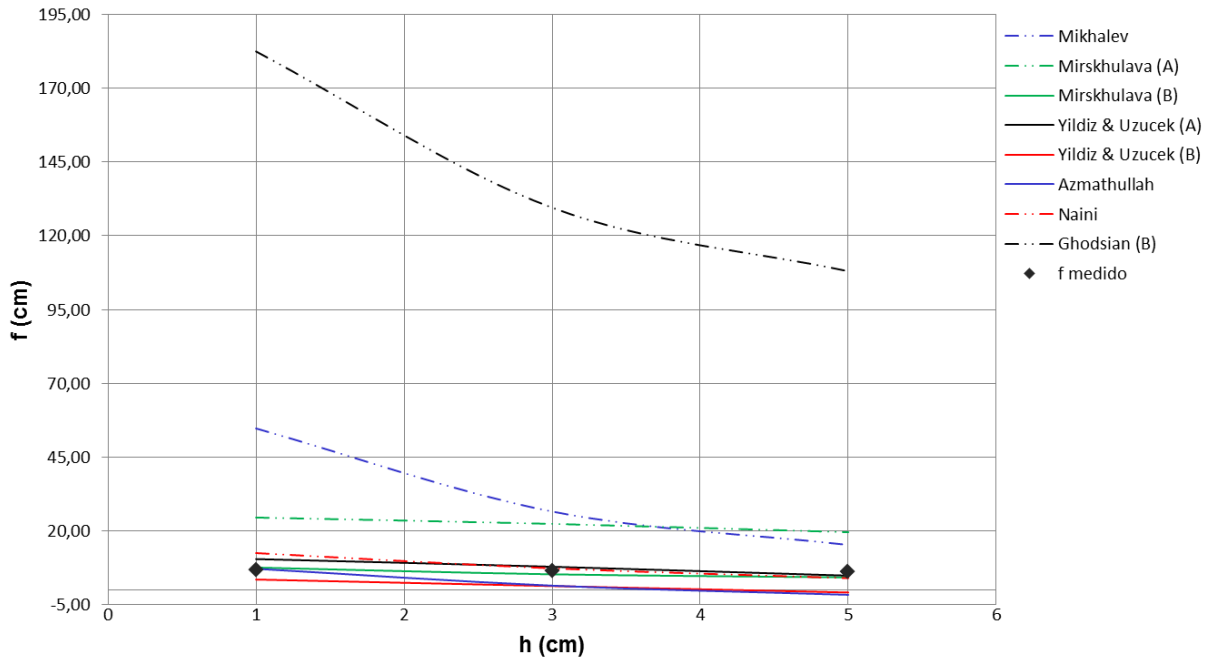


Figura F.13 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q = 0,71 \text{ L/s}$ e $\alpha = 25^\circ$).

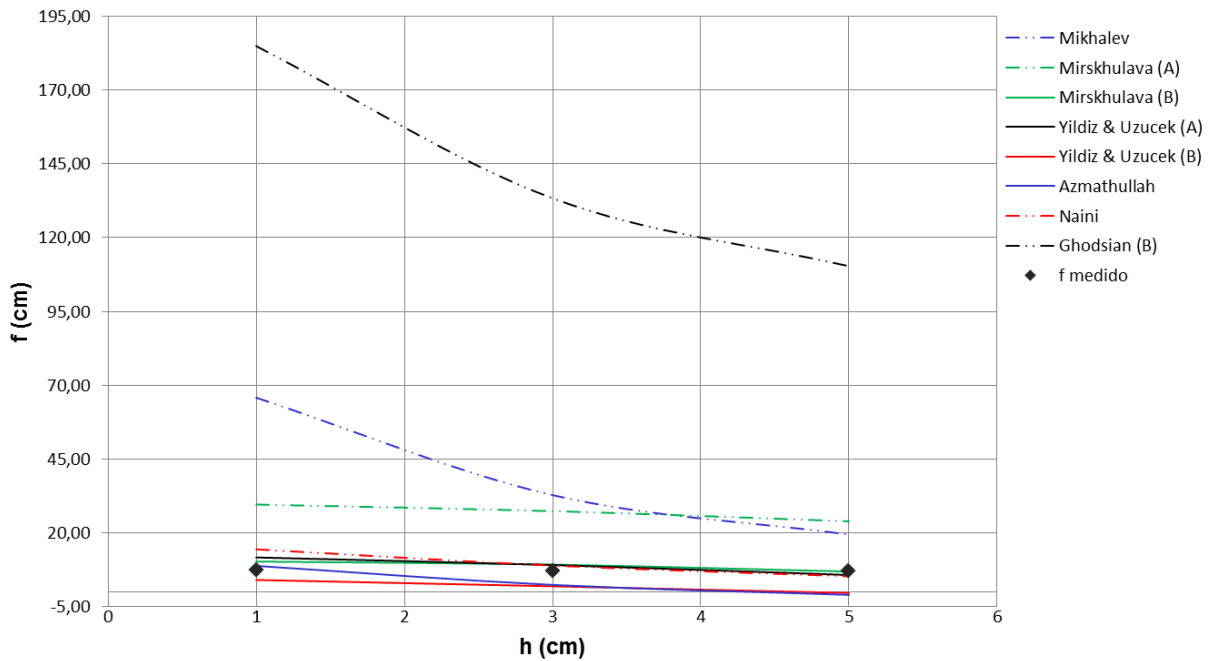


Figura F.14 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo III ($Q = 0,85 \text{ L/s}$ e $\alpha = 25^\circ$).

Quadro F.11 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 25^\circ$ - Grupo IV e V (medidas em cm).

Autor	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
Mason (B) (1989)	1,69	2,01	2,17	1,89	2,24	2,42
Hoffmans (1998)	11,52	8,81	5,94	12,83	10,26	7,05
Zhang et al. (2014)	23,60	20,31	17,86	24,42	22,38	19,01
Doddiah & Thomas (1953)	41,02	13,75	6,94	53,90	18,55	8,92

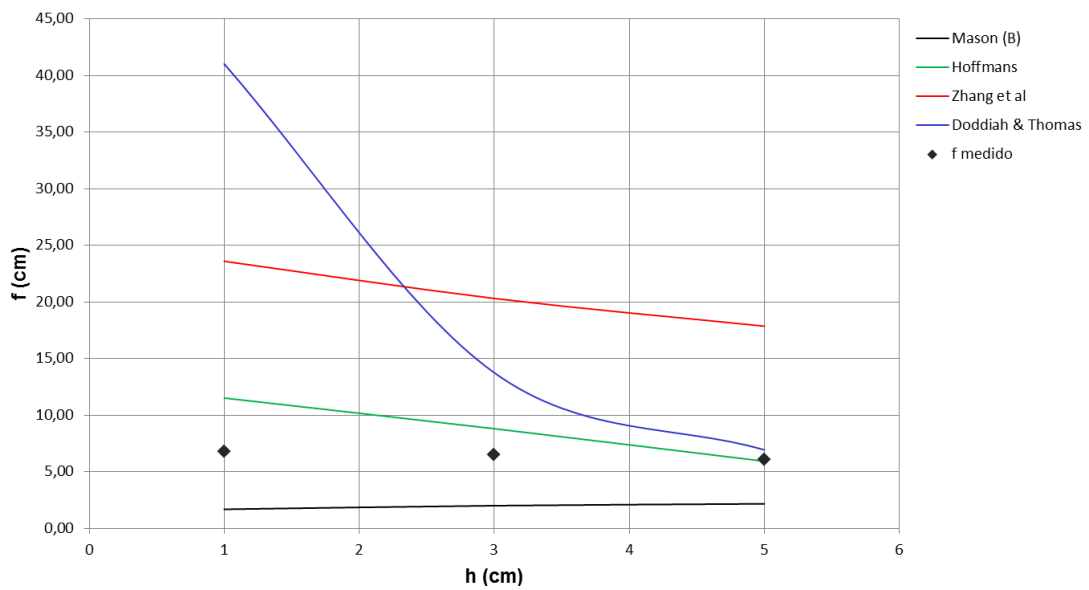


Figura F.15 – Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q = 0,71$ L/s e $\alpha = 25^\circ$).

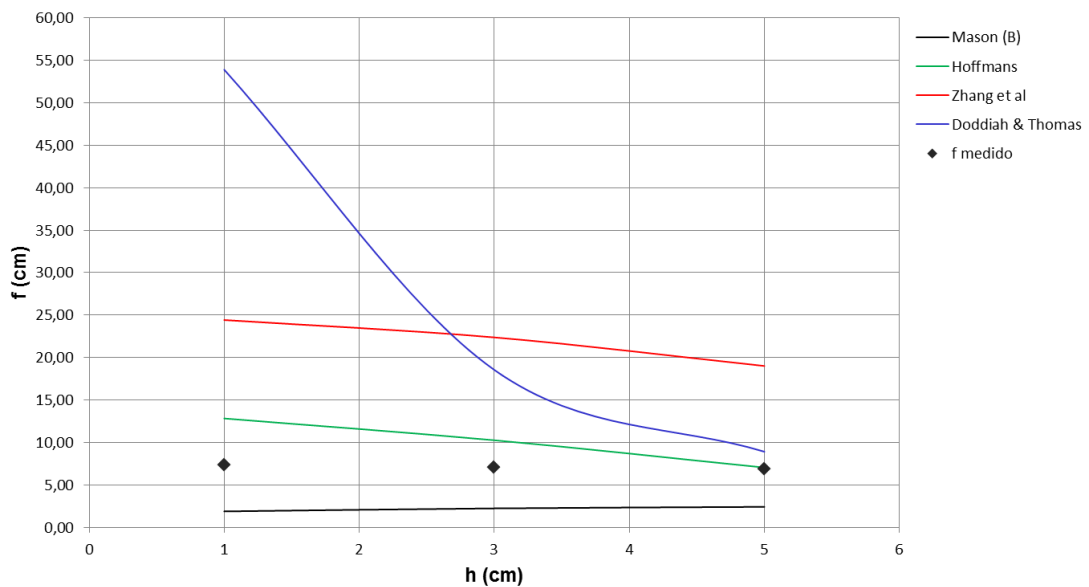


Figura F.16 - Comparação das profundidades máximas medidas com as previstas do grupo IV e V ($Q = 0,85$ L/s e $\alpha = 25^\circ$).

Quadro F.12 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo I (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,1 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Schoklitsch (1935)	7,56	10,66
Patrashev (1937)	8,00	11,20
Veronese (A) (1937)	3,75	5,28
Veronese (B) (1937)	11,83	16,65
Eggenburger (1944)	35,81	58,83
Hartung (1959)	25,46	39,37
Franke (1960)	39,88	67,56
Damle (A) (1966)	5,04	7,92
Bisaz e Tschopp (1972)	16,45	23,13
Chian Min Wu (1973)	7,14	9,96
Chee & Kung (1974)	15,07	21,53
Chee & Padivar (1969)	19,12	27,92
Martins (B) (1984)	8,93	12,18
Taraimovich (1978)	4,77	7,20
Machado (1980)	10,30	14,86
SOFRELEC (1985)	13,69	18,68
INCYTH (1985)	8,56	11,98

Quadro F.13 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo II (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,1 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Jaeger (1939)	8,41	13,77
Martins (A) (1984)	4,40	5,09
Rubinstein (1963)	24,85	42,13
Mason & Arumugam (1985)	6,77	10,09
Ghodsian(A) (1999)	-4,40	-4,15
Heng et al. (2013)	12,37	11,15
Bombardelli & Gioia (2006)	12,70	27,46

Quadro F.14 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo III (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,1 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Mikhalev (1960)	14,94	28,64
Mirskhulava (A) (1967)	19,90	33,52
Mirskhulava (B) (1967)	2,2	12,48
Yildiz & Uzucek (A) (1994)	5,16	8,19
Yildiz & Uzucek (B) (1996)	-0,33	1,57
Azmathullah et al. (2004)	-1,52	0,61
Naini (2011)	3,75	7,69
Ghodsian (B) (2012)	90,10	98,77

Quadro F.15 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 30^\circ$ - Grupo IV e V (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,1 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Mason (B) (1989)	2,16	2,84
Hoffmans (1998)	5,95	9,71
Zhang et al. (2014)	16,47	22,21
Doddiah & Thomas (1953)	5,99	14,44

Quadro F.16 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo I (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,19 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Schoklitsch (1935)	7,54	10,94
Patrashev (1937)	7,99	11,39
Veronese (A) (1937)	3,74	5,39
Veronese (B) (1937)	11,80	17,01
Eggenburger (1944)	35,74	58,97
Hartung (1959)	25,40	39,97
Franke (1960)	39,78	68,08
Damle (A) (1966)	5,03	7,88
Bisaz e Tschopp (1972)	16,41	23,52
Chian Min Wu (1973)	7,12	10,15
Chee & Kung (1974)	15,03	22,14
Chee & Padivar (1969)	19,06	28,91
Martins (B) (1984)	8,90	12,64
Taraimovich (1978)	4,76	7,41
Machado (1980)	10,28	15,02
SOFRELEC (1985)	13,65	19,37
INCYTH (1985)	8,54	12,18

Quadro F.17 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo II (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,19 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Jaeger (1939)	8,38	14,08
Martins (A) (1984)	4,39	5,20
Rubinstein (1963)	24,70	45,96
Mason & Arumugam (1985)	6,74	10,83
Ghodsian(A) (1999)	-4,40	-4,14
Heng et al. (2013)	12,38	10,85
Bombardelli & Gioia (2006)	12,67	27,24

Quadro F.18 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo III (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,19 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Mikhalev (1960)	15,03	31,29
Mirskhulava (A) (1967)	20,05	36,93
Mirskhulava (B) (1967)	2,2	13,42
Yildiz & Uzucek (A) (1994)	5,35	9,01
Yildiz & Uzucek (B) (1996)	1,59	4,50
Azmathullah et al. (2004)	-0,94	2,05
Naini (2011)	3,69	8,18
Ghodsian (B) (2012)	64,60	69,92

Quadro F.19 - Profundidades máximas obtidas para $\alpha = 45^\circ$ - Grupo IV e V (medidas em cm).

Autor	Q = 0,71 L/s	Q = 1,19 L/s
	h = 5 cm	h = 5 cm
Mason (B) (1989)	2,15	2,97
Hoffmans (1998)	6,04	10,24
Zhang et al. (2014)	16,48	21,03
Doddiah & Thomas (1953)	5,98	14,12

ANEXO G: DIMENSÕES EM PLANTA

G.1: VALORES MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE

Quadro G.1 - Comparação dos valores de L^* , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 25^\circ$ (medidas em cm).

Autor	L^*					
	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
Azmathullah (2004)	50,31	47,72	45,40	55,11	53,61	50,23
Naini (2011)	33,38	30,36	27,70	36,07	34,47	30,58
Ghodsian (A) (1999)	9,30	9,16	8,63	9,81	10,21	9,33
Experimental	16	18	18	18	18	22

Quadro G.2 - Comparação dos valores de B_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 25^\circ$ (medidas em cm).

Autor	B_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
Azmathullah (2004)	18,81	18,27	17,13	19,32	19,79	18,03
Naini (2011)	7,11	7,00	6,94	7,12	7,02	6,96
Ghodsian (B) (2012)	227,69	206,90	191,40	232,17	218,54	198,29
Ghodsian (A) (1999)	28,03	31,29	31,12	30,19	35,74	34,39
Experimental	60	49	37	64	56	42

Quadro G.3 - Comparação dos valores de L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 25^\circ$ (medidas em cm).

Autor	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
Naini (2011)	50,51	38,14	32,89	57,51	44,16	37,64
Ghodsian (B) (2012)	175,03	128,23	103,84	181,94	142,95	111,40
Experimental	30	35	34,5	35	37	40,5

Quadro G.4 - Comparação dos valores de L^* , B_s e L_s , obtidos pelas expressões e experimentais, para $\alpha = 30^\circ$ (medidas em cm).

Autor	$h = 5 \text{ cm}$					
	$Q = 0,71 \text{ L/s}$			$Q = 1,1 \text{ L/s}$		
	L^*	B_s	L_s	L^*	B_s	L_s
Azmathullah (2004)	40,75	15,17	-	55,84	19,46	-
Naini (2011)	21,60	9,26	31,95	31,06	9,34	46,81
Ghodsian (B) (2012)	-	160,59	86,54	-	190,23	121,16
Ghodsian (A) (1999)	8,01	28,75	-	11,07	42,32	-
Experimental	14	34	46	26	45	66

G.2: FOTOGRAFIAS DA ESCAVAÇÃO DE EROSÃO



Figura G.1 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,51$ L/s e $h = 1$ cm.



Figura G.2 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,51$ L/s e $h = 3$ cm.



Figura G.3 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,51$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.4 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 1$ cm.



Figura G.5 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.6 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,85$ L/s e $h = 1$ cm.



Figura G.7 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,85$ L/s e $h = 3$ cm.



Figura G.8 – $\alpha = 20^\circ$, $Q = 0,85$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.9 – $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 1$ cm.



Figura G.10 – $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 3$ cm.



Figura G.11 – $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.12 – $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,85$ L/s e $h = 1$ cm.



Figura G.13 – $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,85$ L/s e $h = 3$ cm.



Figura G.14 – $\alpha = 25^\circ$, $Q = 0,85$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.15 – $\alpha = 30^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.16 – $\alpha = 30^\circ$, $Q = 1,1$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.17 – $\alpha = 45^\circ$, $Q = 0,71$ L/s e $h = 5$ cm.



Figura G.18 – $\alpha = 45^\circ$, $Q = 1,19$ L/s e $h = 5$ cm.