

DISSIPAÇÃO DE ENERGIA A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR NÃO CONVENCIONAL

NUNO ANDRÉ XAVIER FIGUEIREDO

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

Professora Doutora Maria Fernanda Quintela da Silva Proença

JULHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

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 - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo 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 electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e Avós

A paciência e a perseverança têm um efeito mágico diante do qual as dificuldades desaparecem e os obstáculos ausentam-se

John Quincy Adams

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não representa apenas o resultado de extensas horas de estudo, reflexão e trabalho durante as diversas etapas que a constituem. É igualmente o culminar de um objectivo académico a que o autor se propôs e que não seria possível sem a colaboração de um número considerável de pessoas que, quer através de orientação técnica e científica como através do incentivo, amizade e amor incondicionais, tornaram este caminho mais fácil e suportável. Assim, a todas essas pessoas que, de forma directa ou indirecta, tornaram este projecto uma realidade, o autor expressa a sua profunda gratidão e reconhecimento. Correndo o risco de esquecimentos indesejáveis, o autor não poderia deixar de particularizar algumas pessoas, que pelo seu contributo, se tornaram mais preponderantes:

- À Professora Doutora Maria Fernanda Quintela da Silva Proença pelo empenho, dedicação, disponibilidade, espírito crítico, apoio, compreensão, entusiasmo, amizade e preocupação por fazer sempre mais e melhor;
- À Professora Elsa Maria Silva Carvalho pela ajuda prestada no dia-a-dia de trabalho no laboratório, valiosas sugestões, apoio e amizade;
- Ao Professor Doutor Joaquim Gabriel Magalhães Mendes pela constante disponibilidade, valiosíssima contribuição e apoio relativamente à utilização das sondas piezo-eléctricas e do sistema de aquisição de dados;
- Ao Professor Doutor Álvaro Alberto de Matos Ferreira da Cunha pela disponibilização do martelo dinâmico para calibração das sondas piezo-eléctricas;
- Ao Sr. Aníbal Lopes de Sousa Miranda pela criatividade, engenho e empenho na tentativa de auxiliar à procura da melhor solução técnica;
- Ao Rui Jorge Ferreira Aleixo pela preciosa contribuição na valorização técnica deste trabalho;
- Ao Sérgio Bernardes e ao André Silva pela grande amizade, ajuda e apoio incondicional ao longo dos cinco anos deste curso;
- À Ana pelo apoio total, orgulho, compreensão, carinho e amor em todos os momentos deste difícil caminho;
- À minha família, especialmente aos meus Pais e Avós que, embora estejam no fim desta lista, se encontram em primeiro lugar no coração do autor por, ao longo de todos os dias, através dos seus ensinamentos, experiência de vida, apoio, amizade, carinho, alegria, sacrifício, orgulho e amor incondicional, o tornarem uma melhor pessoa.

RESUMO

Este trabalho centrou-se no estudo experimental, em modelo reduzido, da dissipação de energia a jusante de um descarregador de degraus equipado com um trampolim em salto de esqui.

Para tal foi utilizada a instalação experimental já existente no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto que é integrada por um descarregador não convencional de degraus.

Os ensaios experimentais foram realizados em duas fases. Na primeira, onde se realizaram ensaios em fundo fixo, foram levados a cabo estudos de trajectórias dos jactos provenientes das descargas, medições de pressões médias e flutuações de pressão para várias situações de escoamento correspondentes a diferentes caudais e diferentes espessuras de colchões de água. Na segunda fase realizaram-se ensaios em fundo móvel que possibilitaram avaliar as características e dimensões das fossas de erosão geradas e a sua comparação com valores teóricos obtidos através das expressões da literatura.

Refere-se também o sucesso da aplicação de novas técnicas laboratoriais como a técnica de aquisição de imagens para estudo da trajectória de jactos e a utilização de sondas piezo-eléctricas para medição de flutuações de pressão.

Por fim, foram retiradas conclusões tendo por base a comparação das acções actuates no leito do canal de restituição (dados obtidos na primeira fase de ensaios) com as fossas de erosão registadas na segunda fase de ensaios.

PALAVRAS-CHAVE: Dissipação de energia, salto de esqui, fundo fixo, fundo móvel, flutuação pressão, fossa de erosão.

ABSTRACT

The present work concerns the experimental study, using a reduced model, of the energy dissipation downstream of a stepped spillway equipped with a ski jump bucket.

For the development of the work it was used an experimental facility, already available at the Hydraulics Laboratory of the Hydraulics, Water Resources and Environment Section of the Faculty of Engineering of the University of Porto. The experimental set-up included a stepped spillway that was equipped with a ski jump bucket prepared specially for this purpose. The downstream discharge channel bottom was prepared in order to allow tests considering fixed and movable beds.

Experimental tests were carried out in two phases. At the first phase, studies have been performed in order to define flood discharges jet trajectories, mean pressures and pressure fluctuations, for various flow situations corresponding to different flow rates and different tail water levels. At the second phase tests were performed considering a movable bed enabling the evaluation of the characteristics and dimensions of the generated scour holes and allowing their comparison with theoretical values obtained through the equations gathered from the literature review.

It is also important mentioning the successful implementation of new laboratory techniques in this study, such as the imaging capture technique applied to study the trajectory of jets and the use of piezo-electric probes for measuring pressure fluctuations.

Finally, some conclusions have been drawn based on the comparison of the actions in the riverbed of restitution channel (data obtained in the first testing phase) with the scour holes observed in the second round of tests.

KEYWORDS: Energy dissipation, ski jump bucket, fixed bed, movable bed, pressure fluctuations, scour hole.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	3
2.1. DISSIPACÃO DE ENERGIA	3
2.2. TIPOS DE ÓRGÃOS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA	4
2.2.1. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO	4
2.2.2. BACIAS DE DISSIPACÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO	6
2.2.3. BACIAS DE DISSIPACÃO POR MACRO-RUGOSIDADES	6
2.2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO	7
2.2.5. BACIAS DE DISSIPACÃO POR JACTOS	8
2.2.5.1. Alcance e ângulos de incidência teóricos	13
2.2.5.2. Alcance efectivo	16
2.2.5.3. Previsão da fossa de erosão.....	18
2.2.5.4. Ensaio em modelo físico	25
3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	27
3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO	27
3.2. MODELO DE SEMELHANÇA UTILIZADO	33
3.3. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO NOS ESTUDOS EM FUNDO MÓVEL	34
3.4. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	35
3.4.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS	35
3.4.2. MEDIÇÃO DE PRESSÕES MÉDIAS NO FUNDO DO CANAL DE RESTITUIÇÃO	36
3.4.3. MEDIÇÃO DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO NO FUNDO DO CANAL DE RESTITUIÇÃO	37
3.4.4. MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA.....	38

3.4.5. REGISTO DE TRAJECTÓRIAS REAIS DE JACTOS POR TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS	42
3.4.6. DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DA FOSSA DE EROSÃO	43
3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	46
3.6. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	47
3.6.1. MEDIDOR DE CAUDAIS	47
3.6.2. TRANSDUTOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO	51
3.6.3. SONDAS PIEZO-ELÉCTRICAS	54
3.6.4. FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO	56
3.6.5. IMAGEM DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	61
3.7. CONDIÇÕES DE TESTE	62
 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	 63
4.1. APRECIACÕES GERAIS.....	63
4.2. ENSAIOS EM FUNDO FIXO	63
4.2.1. DETERMINAÇÃO DAS TRAJECTÓRIAS DOS JACTOS	63
4.2.2. MEDIÇÃO DE PRESSÕES MÉDIAS	72
4.2.3. MEDIÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO	86
4.3. ENSAIOS EM FUNDO MÓVEL	97
 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....	 125
5.1. CONCLUSÕES.....	125
5.2. SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....	126
 BIBLIOGRAFIA.....	 129
 ANEXOS.....	 133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. - Formação do ressalto hidráulico.....	5
Figura 2.2. - Barragem de Miranda do Douro	5
Figura 2.3. - Funcionamento do trampolim submerso sem acessórios	6
Figura 2.4. - Construção de rampa de blocos em Sierra County, New Mexico, E.U.A.	7
Figura 2.5. - Esquema de uma bacia de dissipação por impacto, retirado de Peterka [6]	7
Figura 2.6. - Exemplo de dissipação por queda livre, Barragem de Bouçã.....	8
Figura 2.7. - Perfil da Barragem de Bouçã.....	9
Figura 2.8. - Válvula Multi-Jacto.....	9
Figura 2.9. - Saída do escoamento de uma válvula multi-jacto	10
Figura 2.10. - Barragem de Picote, sistema de dissipação por salto de esquí.....	10
Figura 2.11. - Barragem da Aguieira, sistema de dissipação por jactos cruzados.....	11
Figura 2.12. - Diferentes tipos de coxins realizados, adaptado de Hager [36]	12
Figura 2.13. - Escoamento afogado no salto de esquí	12
Figura 2.14. - Escoamento livre no salto de esquí	13
Figura 2.15. - Alcance do jacto, adaptado de Lencastre [44]	13
Figura 2.16. - Alcance teórico do jacto, retirado de Martins [25]	14
Figura 2.17. - Determinação do ângulo teórico de incidência, retirado de Martins [25]	15
Figura 2.18. - Determinação do alcance efectivo do jacto, retirado de Martins [25].....	17
Figura 2.19. - Alcance efectivo do jacto por Kawakami, retirado de Martins [25].....	18
Figura 2.20. - Limites de aplicação de fórmulas, adaptado de Hoffmans [39].....	24
Figura 3.1. - Vista geral do descarregador de degraus	27
Figura 3.2. - Esquema da instalação experimental utilizada	28
Figura 3.3. - Sistema de alimentação da instalação constituído pelos reservatórios 1 (Reservatório de Alimentação da Instalação) e 2 (Reservatório de Alimentação do Descarregador).....	28
Figura 3.4. - Reservatório de tranquilização	29
Figura 3.4. - Canal onde se realiza a restituição a jusante do descarregador	29
Figura 3.6. - Reservatório de Bombagem com bomba submersível.....	30
Figura 3.7. - Trampolim em salto de esquí aplicado	30
Figura 3.8. - Esquema do trampolim em salto de esquí utilizado (medidas em centímetros)	31
Figura 3.9. - Placa de perspex representativa do fundo fixo	32
Figura 3.10. - Pormenor dos pontos de apoio da placa de fundo regulável	32
Figura 3.11. - Pormenor do descarregador de parede delgada regulável.....	33

Figura 3.12. - Curva granulométrica do material granular não coerente utilizado nos ensaios de fundo móvel	34
Figura 3.13. - Equipamento do tipo electromagnético para medição de caudais	35
Figura 3.14. - Transdutor diferencial de pressão utilizado	36
Figura 3.15. - Conjunto suporte móvel/proveta graduada	37
Figura 3.16. - Dimensões das sondas piezo-eléctricas	37
Figura 3.17. - Sondas piezo-eléctricas utilizadas para a medição de flutuações de pressão	38
Figura 3.18. - Pormenor do trampolim com tomada de pressão	39
Figura 3.19. - Flutuador sobre o lábio do trampolim	39
Figura 3.20. - Significado dos parâmetros envolvidos no cálculo da posição angular da vareta e correspondentes alturas de água	41
Figura 3.21. - Sistema Flutuador/Potenciómetro ligado aos adaptadores ajustáveis	41
Figura 3.22. - Vista do leito do rio realizado em material não coerente	43
Figura 3.23. - Exemplo de medição das fossas de erosão	43
Figura 3.24. - Esquema das variáveis envolvidas no cálculo das profundidades de erosão	44
Figura 3.25. - Fossa de erosão com realimentação	45
Figura 3.26. - Fossa de erosão com evolução correcta	45
Figura 3.27. - Placas de aquisição de dados utilizadas neste estudo	46
Figura 3.28. - Reservatório calibrador	47
Figura 3.29. - Lei de calibração do caudalímetro	50
Figura 3.30. - Instalação utilizada para calibração do transdutor diferencial de pressão (à esquerda) e pormenor do aparelho utilizado para leitura dos níveis de água (à direita)	52
Figura 3.31. - Lei de calibração do Transdutor Diferencial de Pressão	53
Figura 3.32. - Equipamentos utilizados na calibração das sondas piezo-eléctricas	54
Figura 3.33. - Comparação da tensão originada pelo martelo dinâmico quando actuando sobre a sonda piezo-eléctrica com a tensão transmitida, ao sistema de aquisição de dados, pela sonda piezo-eléctrica quando sujeita à acção do martelo dinâmico	55
Figura 3.34. - Lei de calibração das sondas piezo-eléctricas	55
Figura 3.35. - Posição correcta de medição da altura de água	56
Figura 3.36. - Lei de calibração da primeira gama de caudais entre 0,5 l/s e 0,9 l/s	59
Figura 3.37. - Lei de calibração da segunda gama de caudais entre 0,9 l/s e 1,3 l/s	59
Figura 3.38. - Lei de calibração da terceira gama de caudais entre 1,3 l/s e 1,7 l/s	60
Figura 3.39. - Lei de calibração da quarta gama de caudais entre 1,7 l/s e 2,5 l/s	60
Figura 3.40. - Imagem de calibração do processo de aquisição de imagem	62

Figura 4.1. - Referência física para aplicação da técnica de aquisição de imagem e determinação correcta do L_{medido}	64
Figura 4.2. - Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos, efectivos e medidos através da T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m)	65
Figura 4.3. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de impacto teóricos θ'_t com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m).....	66
Figura 4.4. - Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água	67
Figura 4.5. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água	68
Figura 4.6. - Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os valores obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades.....	69
Figura 4.7. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de impacto teóricos com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades	70
Figura 4.8. - Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades.....	71
Figura 4.9. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades.....	71
Figura 4.10. - Reservatório de jusante equipado com tubos piezométricos	72
Figura 4.11. - Disposição das tomadas de pressão medidas, na placa de perspex, relativamente ao caudal descarregado	73
Figura 4.12. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,51$ l/s	77
Figura 4.13. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,71$ l/s	78
Figura 4.14. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,85$ l/s	79
Figura 4.15. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,99$ l/s	80
Figura 4.16. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,27$ l/s	81
Figura 4.17. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,77$ l/s	82
Figura 4.18. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=2,40$ l/s	83
Figura 4.19. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 1$ cm	84

Figura 4.201. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 2$ cm.....	84
Figura 4.21. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 3$ cm.....	85
Figura 4.22. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 4$ cm.....	85
Figura 4.23. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 5$ cm.....	86
Figura 4.24. - Impacto do jacto na sonda piezo-eléctrica S2	87
Figura 4.25. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm	90
Figura 4.26. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm	91
Figura 4.27. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm	92
Figura 4.28. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm	93
Figura 4.29. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm	94
Figura 4.30. - Variação da razão $R.M.S./ P_{média} $ de acordo com o ponto de medida, para $Q=0,51$ l/s e para os diferentes colchões de água.....	95
Figura 4.31. - Variação da razão $R.M.S./ P_{média} $ de acordo com o ponto de medida, para $Q=0,71$ l/s e para os diferentes colchões de água.....	95
Figura 4.32. - Variação da razão $R.M.S./ P_{média} $ de acordo com o ponto de medida, para $Q=0,85$ l/s e para os diferentes colchões de água.....	96
Figura 4.33. - Representação no tempo do sinal adquirido pela sonda piezo-eléctrica S2 durante um intervalo de tempo de 5 segundos relativamente à altura do colchão de água	96
Figura 4.34. - Aspecto geral do leito.....	97
Figura 4.35. - Representação gráfica dos valores D obtidos experimentalmente	100
Figura 4.36. - Representação gráfica dos valores f obtidos experimentalmente	100
Figura 4.37. - Aspecto final do leito após ensaio onde a altura do colchão de água foi um factor condicionante da altura da barra	100
Figura 4.38. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm	101
Figura 4.39. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm	102
Figura 4.40. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm	103
Figura 4.41. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm	104
Figura 4.42. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm	105
Figura 4.43. - Comparação de $D_{expressão}$ com D_{medido} segundo a expressão de Martins (B).....	112
Figura 4.44. - Comparação de $f_{expressão}$ com f_{medida} segundo a expressão de Martins (B).....	113
Figura 4.45. - Comparação de $D_{expressão}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A)	113

Figura 4.46. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A).....	114
Figura 4.47. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B).....	114
Figura 4.48. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B).....	115
Figura 4.49. – Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A) com valor de K proposto	116
Figura 4.50. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A) com valor de K proposto	116
Figura 4.51. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B) com K calculado através da expressão (2.16.).....	117
Figura 4.52. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B) com K calculado através da expressão (2.16.).....	117
Figura 4.53. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm)	119
Figura 4.54. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm)	120
Figura 4.55. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm)	121
Figura 4.56. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm)	122
Figura 4.57. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm)	123

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. - Coeficientes para aplicação da expressão 2.10.	19
Quadro 3.1. - Algumas razões de escala segundo a lei de Froude.....	34
Quadro 3.2. - Características das escalas de medição utilizadas	48
Quadro 3.3. - Registos dos intervalos de tempo necessários para o enchimento de 20 litros no reservatório calibrador.....	48
Quadro 3.4. - Caudais relativos aos intervalos de tempo indicados no Quadro 3.4.....	49
Quadro 3.5. - Registo dos caudais lidos no visor do equipamento de medição de caudais	49
Quadro 3.6. - Análise estatística dos valores registados no computador.....	50
Quadro 3.7. - Registo dos níveis de água e análise estatística dos registos efectuados pelo transdutor diferencial de pressão	53
Quadro 3.8. - Processo de calibração para a gama de caudais de 0,5 a 0,9 l/s ($A=15,2$ cm)	57
Quadro 3.9. - Processo de calibração para a gama de caudais de 0,9 a 1,3 l/s ($A=15,4$ cm)	58
Quadro 3.10. - Processo de calibração para a gama de caudais de 1,3 a 1,7 l/s ($A=15,7$ cm)	58
Quadro 3.11. - Processo de calibração para a gama de caudais de 1,7 a 2,5 l/s ($A=16$ cm)	58
Quadro 3.12. - Testes de determinação de velocidades pelo flutuador	61
Quadro 3.13. - Resumo das condições de teste	62
Quadro 4.1. - Velocidades de saída e comparação dos alcances teóricos, efectivos e medidos através da T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m)	65
Quadro 4.2. - Valores dos ângulos de impacto teóricos θ'_i e comparação com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m).....	66
Quadro 4.3. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água	67
Quadro 4.4. - Comparação dos alcances efectivos com os valores obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades	69
Quadro 4.5. - Comparação dos ângulos de impacto teóricos com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades	70
Quadro 4.6. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades.....	70
Quadro 4.7. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h\approx 1$ cm	74
Quadro 4.8. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h\approx 2$ cm	74
Quadro 4.9. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h\approx 3$ cm	75
Quadro 4.10. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h\approx 4$ cm	75
Quadro 4.11. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h\approx 5$ cm	76

Quadro 4.12. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,51$ l/s.....	77
Quadro 4.13. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,71$ l/s.....	77
Quadro 4.14. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,85$ l/s.....	78
Quadro 4.15. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,99$ l/s.....	79
Quadro 4.16. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,27$ l/s.....	80
Quadro 4.17. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,77$ l/s.....	81
Quadro 4.18. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=2,40$ l/s.....	82
Quadro 4.19. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm	87
Quadro 4.20. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm	88
Quadro 4.21. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm	88
Quadro 4.22. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm	88
Quadro 4.23. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm	88
Quadro 4.24. - Levantamento do perfil de erosão para $Q= 0,5$ l/s e $h \approx 5$ cm	98
Quadro 4.25.- Resumo das profundidades máximas de erosão verificadas para $Q=0,51$ l/s.....	98
Quadro 4.26. - Resumo das profundidades máximas de erosão verificadas para $Q=0,71$ l/s	99
Quadro 4.27. - Resumo das profundidades máximas de erosão verificadas para $Q=0,85$ l/s	99
Quadro 4.28. - Valores da queda para $Q=0,51$ l/s	106
Quadro 4.29. - Valores da queda para $Q=0,71$ l/s	106
Quadro 4.30. - Valores da queda para $Q=0,85$ l/s	106
Quadro 4.31. - Valores dos caudais utilizados.....	107
Quadro 4.32. - Diâmetros característicos do material granular utilizado nos ensaios.....	107
Quadro 4.33. - Resumo das fossas obtidas para $Q= 0,51$ l/s (em modelo).....	108
Quadro 4.34. - Resumo das fossas obtidas para $Q= 0,71$ l/s (em modelo).....	109
Quadro 4.35. - Resumo das fossas obtidas para $Q= 0,85$ l/s (em modelo).....	110
Quadro 4.36. - Valores de $D_{\text{expressão}}$ e de $f_{\text{expressão}}$ segundo a expressão de Mason & Arumugam (A) com valor de K proposto.....	115
Quadro 4.37. – Valores de K propostos no cálculo dos parâmetros apresentados nas figuras 4.51. e 4.52.	118

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a - distância, na horizontal, entre o lábio do trampolim em salto de esquí e o ponto do perfil de erosão que se pretende medir (m)

A - altura entre o lábio do trampolim em salto de esquí e o centro de rotação do eixo do potenciómetro (m)

b_0 - altura do jacto no impacto (m)

B - comprimento da vareta de suporte do flutuador (m)

d/2 - raio do flutuador (m)

d_i - diâmetro de peneiração em que há passagem de $i\%$, em peso, da amostra de material do leito (m)

d_m - diâmetro médio (m)

D - profundidade máxima da escavação medida a partir da superfície livre a jusante (m)

e - espessura da placa de perspex sobre o lábio do trampolim em salto de esquí (m)

f - profundidade de erosão relativamente ao leito inicial (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)

Fr - número de Froude, sendo que no capítulo 2 este se encontra na definição em que a velocidade figura ao quadrado e no capítulo 3 na sua forma clássica

g - aceleração da gravidade (m/s^2)

h - espessura do colchão de água a jusante (m)

h_0 - altura do escoamento na secção considerada (m)

H - queda (m)

H_0 - desnível entre a linha de energia na secção inicial e o eixo da secção considerada (queda na secção de saída do trampolim) (m)

H'_0 - desnível entre o nível de água a montante e o eixo da secção considerada (m)

H_1 - desnível entre o eixo da secção inicial e o plano horizontal em relação ao qual se pretende conhecer o alcance (m)

i_0, j_0 - dimensões, em pixeis, na horizontal e na vertical respectivamente

K - coeficiente adimensional das fórmulas de previsão da profundidade máxima de erosão

K_r - factor de rugosidade

L - alcance efectivo do jacto (m)

L_{medido} - alcance do jacto medido por técnica de aquisição de imagens (m)

L_t - alcance teórico do jacto (m)

L_{medido} - alcance do jacto obtido experimentalmente (m)

n_1 - factor correctivo

N - parâmetro de cálculo da fórmula de Martins (A)

P_m - pressão média (m.c.a.)

q - caudal unitário por largura (m^2/s)

Q - caudal escoado (m^3/s)

T - distância medida na vertical entre a face inferior da estrutura de suporte das varetas e o perfil inicial do leito (m)

U_0 - velocidade na secção de saída do trampolim em salto de esquí, ou velocidade média inicial do jacto

x, y - coordenadas do jacto (m)

x_0, y_0 - dimensões físicas na horizontal e na vertical respectivamente (m)

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

W - velocidade de queda das partículas (m/s)

α_x, α_y - factores de calibração de imagem (horizontal e vertical respectivamente)

β - ângulo entre a posição da vareta ligada ao flutuador e a vertical (graus)

γ - peso específico da água (kN/m^3)

γ_s - peso específico do material do leito do rio (kN/m^3)

γ_0 - peso específico da água tendo em conta o emulsionamento (kN/m^3)

$\bar{\delta}$ - quociente de volume de ar contido no escoamento pelo respectivo volume de água

ΔH - perda de carga (m)

ΔL - diferença entre o alcance do jacto medido por técnica de aquisição de imagens e o alcance efectivo do jacto (m)

$\Delta\theta'$ - diferença entre o ângulo de incidência medido por técnica de aquisição de imagens e o ângulo de incidência teórico (graus)

η - quociente de velocidade instantânea máximo num ponto pela velocidade média nesse mesmo ponto

θ - ângulo de saída do trampolim em salto de esquí (graus)

θ'_{medido} - ângulo de incidência do jacto no colchão de água a jusante medido por técnica de aquisição de imagens (graus)

θ'_t - ângulo teórico de incidência do jacto no colchão de água a jusante (graus)

λ_L - factor de escala dos comprimentos

cm.c.a.- centímetros coluna de água

R.M.S. - *root mean square* (ou desvio-padrão)

T.A.I. - técnica de aquisição de imagens

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

O presente estudo insere-se no âmbito da cadeira de “Dissertação em Hidráulica” do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este trabalho, realizado ao longo de 5 capítulos, constitui a dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica.

A dissipação de energia das descargas de cheia é um assunto da maior importância na construção de aproveitamentos hidráulicos merecendo grande atenção por parte dos projectistas, sendo a dissipação por jactos um dos processos utilizados para dissipação da energia dessas descargas.

O objectivo da presente dissertação é o estudo experimental em modelo reduzido, da dissipação de energia a jusante de um descarregador de degraus munido de um trampolim em salto de esquí. Após recolha de elementos bibliográficos sobre o assunto desenvolveu-se o trabalho experimental que decorreu no Laboratório de hidráulica da Faculdade de Engenharia, onde o modelo do descarregador de degraus se encontrava já disponível. Para o presente trabalho procedeu-se à construção do trampolim em salto de esquí, necessário a este estudo, sendo então aplicado na extremidade de jusante do descarregador anteriormente referido.

Com os estudos realizados pretendeu-se analisar o efeito do impacto dos jactos provenientes das descargas, no leito do canal onde a restituição dos caudais é realizada. Foram considerados vários caudais e diferentes espessuras de colchões de água, tendo sido realizados ensaios em fundo fixo e em fundo móvel.

Os ensaios em fundo fixo tiveram como objectivos a análise das trajectórias dos jactos para as diferentes situações de escoamento e o estudo da acção do impacto dos mesmos no escoamento a jusante. Esta acção foi analisada através da avaliação, para os vários caudais e espessuras de água considerados, dos valores das pressões médias e da sua complementação com a medição das flutuações de pressão com a intenção de determinar a sua eventual influência nos processos de formação de fossas de erosão quando da consideração de fundos móveis.

Nos ensaios em fundo fixo foram introduzidas novas técnicas laboratoriais. Assim, na determinação da trajectória real dos jactos provenientes das descargas foi usada a técnica de aquisição de imagens que permite determinar através de fotografia, e com “software” adequado as referidas trajectórias e na medição de flutuações de pressão foram utilizadas sondas piezo-eléctricas, técnicas que se revelaram adequadas aos objectivos do trabalho.

Concluídos os ensaios em fundo fixo, foi colocado um fundo móvel, constituído por material granular não coerente tendo-se procedido aos ensaios, utilizando as condições de escoamento, já consideradas, tendo sido avaliadas as características das fossas de erosão originadas nos diferentes casos e comparadas as profundidades registadas com as previstas por fórmulas de diferentes autores, sobre o mesmo assunto.

O conjunto de resultados obtidos nos ensaios permitiu fazer considerações sobre os valores das pressões médias e das flutuações de pressão registadas, no fundo do canal onde a restituição é realizada, da sua importância relativa entre si e com as pressões existentes em caso de não ocorrer a descarga e ainda da sua eventual importância no processo de geração de fossas de erosão. O conjunto de resultados mostrou igualmente a necessidade de proceder a ensaios complementares contemplando várias situações diferentes quer de condições de escoamento quer de variação de parâmetros do próprio sistema de dissipação, que permitiriam aprofundar várias questões surgidas.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos principais.

No presente capítulo é feito um enquadramento geral deste estudo.

No segundo desses cinco capítulos será feito um enquadramento teórico sobre o assunto estudado para que seja possível o entendimento dos fundamentos teóricos que suportam este estudo.

No terceiro capítulo será descrita a instalação experimental em que foi desenvolvido o estudo realizado, bem como os equipamentos utilizados nos diversos ensaios que constituem este trabalho.

O quarto capítulo tratará da apresentação e análise detalhada dos resultados experimentais obtidos pelos ensaios realizados para fundo fixo e para fundo móvel.

Por fim, no quinto capítulo, serão apresentadas as conclusões retiradas deste estudo e também algumas sugestões para futuros trabalhos a desenvolver.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. DISSIPACÃO DE ENERGIA

Uma das principais preocupações durante a descarga de caudais de cheia num aproveitamento hidráulico será a restituição dos referidos caudais a jusante desse aproveitamento, em condições o mais semelhantes possível, às do escoamento do curso de água natural. Com a construção do aproveitamento é criado, através da obra de retenção, um desnível entre as superfícies livres de água a montante e jusante e, naturalmente, a passagem de escoamento de montante para jusante, provocará uma perda de carga de valor considerável.

No processo de descarga dos caudais de cheia, a perda de energia ao longo das soleiras descarregadoras depende do tipo de descarregador considerado, sendo em grande parte dos casos reduzida, pelo que a energia do escoamento na secção de jusante desses descarregadores é ainda elevada e, normalmente superior à do curso de água natural.

Será apenas em situações de caudais de cheia reduzidos e claramente inferiores aos de dimensionamento dos órgãos descarregadores ou em casos de descarregadores não convencionais que se conseguirá uma perda de energia idêntica à carga gerada pela construção da obra de restituição.

A dissipação de energia em excesso é, em geral, conseguida por:

- Atrito e turbulência do escoamento;
- Atrito e emulsão de jactos com o ar;
- Impacto dos jactos entre si;
- Impacto e atrito de jactos com a lâmina de água a jusante.

O referido excesso de energia dos escoamentos exige, na maioria dos casos, que sejam previstas obras de protecção do leito nos locais onde ocorre a dissipação de energia, para que não sejam danificadas quaisquer obras anexas ou ocorram erosões inadmissíveis a jusante provocadas pela elevada intensidade de turbulência gerada no processo de dissipação. Caso se verifiquem erosões no leito a jusante, estas deverão verificar-se em locais suficientemente distantes da obra e respectiva fundação. É também razoável afirmar que o processo erosivo não deverá criar problemas significativos, tais como fossas e barras de dimensões consideráveis.

No processo de dissipação de energia da descarga de cheias o factor que se revela de maior importância será a turbulência que se manifestará não só no fenómeno do ressalto hidráulico, mas também no impacto de jactos com a lâmina de água a jusante ou então no cruzamento de jactos entre si.

Sob o ponto de vista qualitativo a turbulência poderá ser vista como um processo no qual a energia cinética do escoamento se transfere para turbilhões de grande dimensão que constituem a estrutura da turbulência, a interferência dos referidos turbilhões irá originar o aparecimento de turbilhões de dimensões cada vez menores, sendo que este ciclo terminará quando os turbilhões possuírem dimensões suficientemente reduzidas para serem dissipados apenas por atrito viscoso, transformando em calor a energia que lhes é transmitida pelos maiores turbilhões.

O fenómeno descrito anteriormente conduzirá a importantes flutuações de pressão nas fronteiras do escoamento que poderão originar:

- Cavitação, que deve ser evitada recorrendo a geometria conveniente dos contornos do escoamento e com arejamento do mesmo;
- Vibração, que poderá ser combatida pela separação do jacto em vários jactos de menor tamanho tentando assim diminuir a dimensão dos grandes turbilhões resultantes da turbulência ou também pelo arejamento das lâminas líquidas;
- Escavações e erosões, provocadas pela variação de pressões que deverá ser evitada pelo resguardo da zona onde vai ocorrer o fenómeno;
- Acções hidrodinâmicas significativas sobre os contornos do escoamento.

2.2. TIPOS DE ÓRGÃOS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

O tipo de dissipação escolhido para cada aproveitamento hidráulico dependerá principalmente do tipo de aproveitamento em causa, dos valores dos caudais a escoar, das características topográficas e geológicas do local. Referem-se de seguida alguns tipos, mais frequentes, de sistemas de dissipação utilizados em aproveitamentos hidráulicos dando-se particular desenvolvimento à dissipação por jactos, assunto que é um dos objectivos desta dissertação.

2.2.1. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

Na dissipação de energia da descarga de caudais de cheia, na maioria dos casos, são utilizados fenómenos como o ressalto hidráulico.

O ressalto hidráulico (Figura 2.1.) é um tipo de escoamento, rapidamente variado, no qual se dá a passagem do regime rápido para o regime lento num determinado comprimento. Neste comprimento, denominado comprimento do ressalto, desenvolve-se uma elevada intensidade de turbulência que conduz a uma considerável dissipação de energia que, obriga, em geral, à necessidade de protecção do leito no trecho do curso de água onde o ressalto se desenvolve.

Deve ser também referido o uso, nas bacias de dissipação por ressalto hidráulico, de acessórios que permitirão diminuir o comprimento do ressalto e como consequência irá reduzir também a extensão da zona a proteger, havendo, no entanto, um aumento do grau de dificuldade do ponto de vista construtivo dessas bacias. Existem então bacias de dissipação com blocos de queda e soleira dentada (Bacia tipo II U.S.B.R.), bacias com blocos de queda, blocos de amortecimento e soleira terminal contínua (Bacia tipo III U.S.B.R.) e bacia com deflectores e soleira terminal contínua (Bacia tipo IV U.S.B.R.).

O escoamento poderá apresentar ainda, a jusante da bacia de dissipação, elevados grau de turbulência e energia residual cujo valor depende da eficiência do processo de dissipação de energia utilizado, mas que, geralmente obriga a adoptar medidas de protecção dessa zona, para evitar a ocorrência de erosão, e que poderá passar pela instalação de filtros invertidos e um tapete de protecção, de enrocamento.

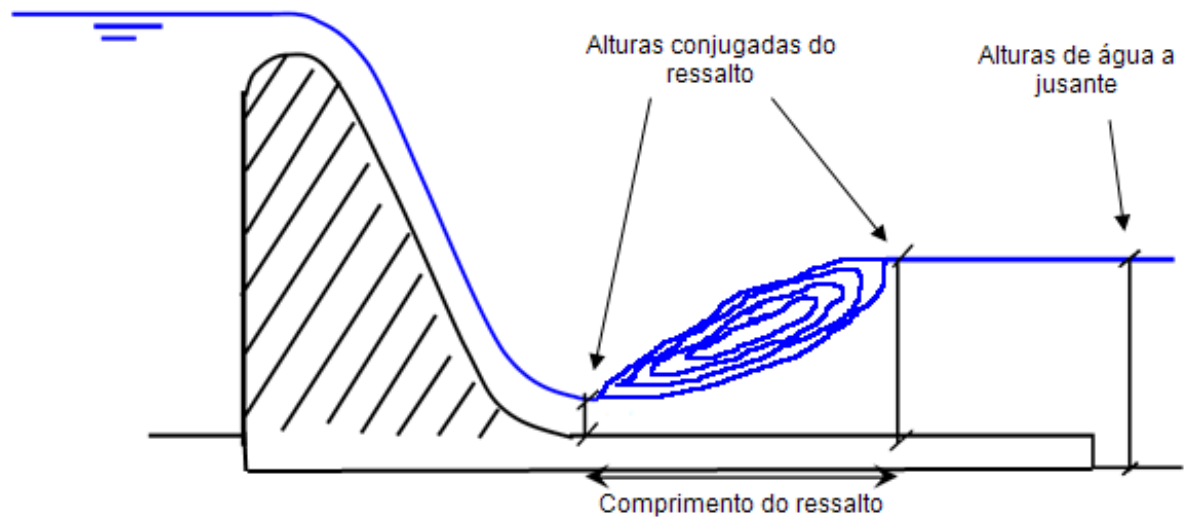


Figura 2.1. – Formação do ressalto hidráulico

Como exemplos de utilização desta solução podem-se indicar os aproveitamentos de Miranda (Figura 2.2.), Bemposta e Carrapatelo.



Figura 2.2. - Barragem de Miranda do Douro

2.2.2. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO

A formação de ressalto hidráulico, anteriormente referido, requer a existência de condições de escoamento a jusante adequadas.

Um nível do escoamento natural a jusante superior ao correspondente ao do regime lento decorrente do ressalto hidráulico conduzirá a uma tendência para o afogamento desse ressalto, podendo, neste caso, optar-se pelo chamado trampolim submerso ou “*roller bucket*” (Figura 2.3.).

A forma deste dissipador provoca a criação de dois rolos de eixo horizontal, com sentidos contrários de rotação, onde será dissipada a energia do escoamento, havendo ainda eventual erosão do leito imediatamente a jusante do trampolim.

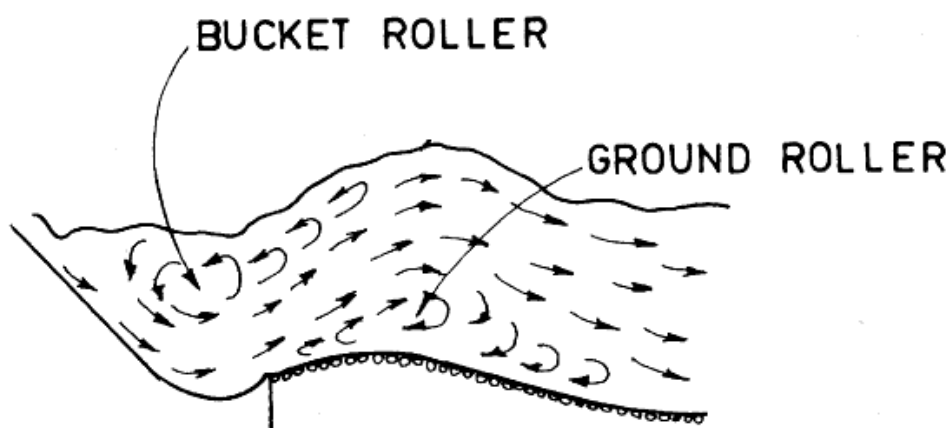


Figura 2.3. - Funcionamento do trampolim submerso sem acessórios

2.2.3. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR MACRO-RUGOSIDADES

Esta estrutura de dissipação (Figura 2.4.) é constituída por uma rampa na qual são aplicados blocos dispostos de forma conveniente, cuja finalidade será, obviamente, provocar a perda de carga do escoamento. Estes blocos terão forma e dimensão ajustada ao caudal de dimensionamento.

A dissipação de energia é provocada por sucessivos impactos do escoamento nos blocos, que estão dispostos em filas cujos espaçamentos se encontram desfasados com os das filas anexas, evitando a aceleração do escoamento da rampa. Se for verificado que entre duas filas de blocos consecutivos se mantêm as características do escoamento médio poderá afirmar-se, embora de forma não rigorosa, que foi atingido o escoamento “uniforme”. Para ser obtido o referido escoamento “uniforme” serão necessárias, no mínimo, quatro filas de blocos.

Na secção de saída do descarregador e para evitar erosão no leito do curso de água na restituição, deverá ser utilizada, à semelhança do que acontece com os outros órgãos de dissipação de energia, um tapete de protecção de enrocamento.



Figura 2.4. - Construção de rampa de blocos em Sierra County, New Mexico, E.U.A.

2.2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO

Este tipo de bacia de dissipação é constituído por uma estrutura em forma de caixa equipada com uma viga transversal com secção em “L” invertido que não necessita que seja mantido qualquer nível de água mínimo a jusante para assegurar o seu normal funcionamento. Embora seja utilizada no final de condutas sob pressão poderá também, com algumas modificações a montante, ser utilizada na extremidade de condutas com escoamento em superfície livre. O impacto do escoamento na viga em “L”, colocada na frente da secção de saída da conduta originará a dissipação de energia.

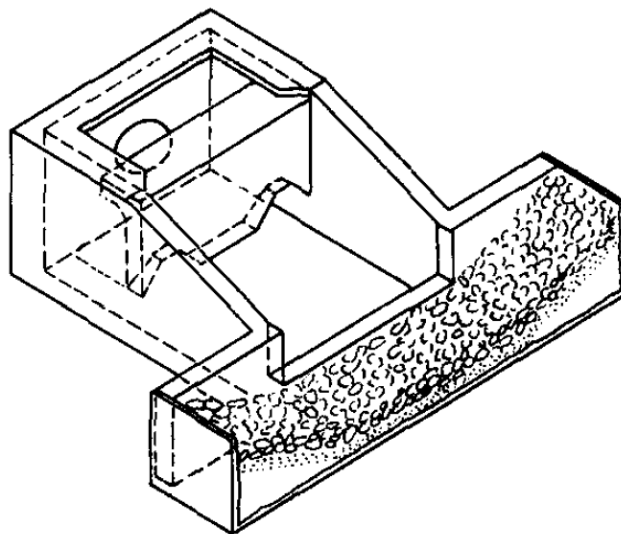


Figura 2.5. - Esquema de uma bacia de dissipação por impacto, retirado de Peterka [6]

2.2.5. BACIAS DE DISSIPACÃO POR JACTOS

A construção de qualquer bacia de dissipação atinge facilmente custos elevados assim, a instalação de descarregadores de cheias em que a dissipação de energia seja feita directamente no leito do rio, evitará esse gasto adicional, sendo uma solução normalmente utilizada quando as condições geológicas do leito do rio forem favoráveis.

A dissipação, nestes casos, é conseguida através do emulsionamento e atrito do jacto com o ar e dos impactos com o colchão de água a jusante e com o próprio leito a jusante.

A acção de impacto do jacto causa no leito do rio grandes pressões que irão originar, para certos valores de caudais descarregados, fossas de grandes dimensões nesse mesmo leito. Até no caso de leitos rochosos existem superfícies de descontinuidade nos maciços que ficarão constituídos por blocos. Assim, se as forças instaladas nos blocos forem suficientemente elevadas para superar o peso submerso dos blocos e as tensões tangenciais, que possam eventualmente existir entre as faces das superfícies de descontinuidade, ocorre o levantamento dos blocos e o arrastamento dos mesmos. Quando se verificar que a capacidade de transporte do escoamento já não permite o arrastamento de um determinado bloco, este irá depositar o que irá contribuir para a formação de uma barra a jusante do local onde se situa a fossa de erosão. Durante o processo de transporte os blocos poderão sofrer fracturação devido a possíveis choques entre si e com os blocos que compõem o leito do rio. Os blocos fracturados terão, como é óbvio, menor dimensão sendo então transportados a maior distância o que irá provocar uma barra de configuração mais alongada a jusante da fossa de erosão.

No estudo de bacias de dissipação por jacto é necessária a análise das características do curso de água e das condições que podem contribuir para a ocorrência da erosão. A tradução dessas características, topográficas e geológicas, em modelo físico é difícil, sendo igualmente difícil a simulação dos processos de fracturação e abrasão dos blocos e o emulsionamento do jacto ao longo do seu percurso.

Na dissipação de energia por jactos existem algumas variantes que serão expostas de seguida. A primeira será a dissipação de energia por queda livre (Figura 2.6.). A zona de impacto poderá ser revestida e protegida por um colchão de água de espessura conveniente originado pela construção de um pequeno açude a jusante (Figura 2.7.).



Figura 2.6. - Exemplo de dissipação por queda livre, Barragem de Bouçã

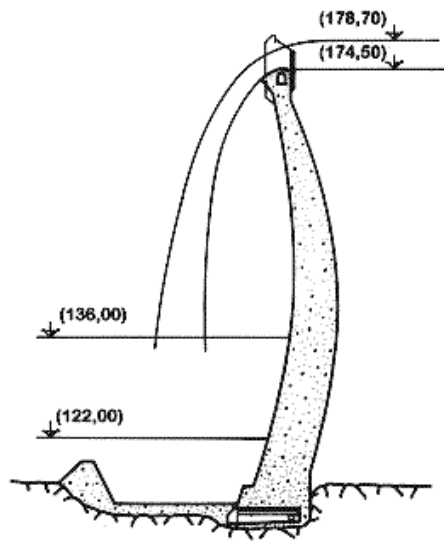


Figura 2.7. - Perfil da Barragem de Bouçã

No caso de descargas através de condutas poderá ser utilizado o sistema de dissipação por multi-jactos, onde terá que ser instalada uma válvula de regulação multi-jacto (Figura 2.8.) na extremidade de uma conduta. Essa válvula terá como princípio de funcionamento o deslocamento relativo e limitado de duas placas perfuradas que permitem a variação da secção de passagem, ou seja das perdas de carga. Assim, como forma de dissipação de energia para além das já habituais por atrito de lâminas de água com o ar, emulsionamento das lâminas de água com o ar e impacto da lâmina de água com o colchão de água a jusante teremos também a perda de parte de energia pela passagem de água na válvula multi-jacto (Figura 2.9.).



Figura 2.8. - Válvula Multi-Jacto



Figura 2.9. - Saída do escoamento de uma válvula multi-jacto

Por fim refere-se a dissipação de energia em salto de esqui (Figura 2.10.), no qual o jacto é projectado por acção de um trampolim construído na extremidade do canal descarregador. O trampolim apresenta a concavidade voltada para cima, em forma de parábola ou círculo, e um deflector que irá projectar a água para cima. Neste caso a dissipação de energia ocorrerá pelos processos habituais de atrito da água com o ar e emulsionamento com este, por impacto da lâmina de água com o colchão de água a jusante e por erosão dos fundos na zona de impacto.

As formas de dissipação de energia referidas, originam, na maior parte dos casos, fossas de erosão de grandes dimensões que devem ser controladas de forma a não pôr em risco a segurança do próprio aproveitamento e a estabilidade das margens do rio.



Figura 2.10. - Barragem de Picote, sistema de dissipação por salto de esqui

Poderá também ser referida a possibilidade de utilização de jactos cruzados em sistemas de dissipação de energia. O canal descarregador e os trampolins de dois jactos serão projectados de forma a provocar o encontro dos jactos durante a descarga originando uma dissipação adicional de energia causada pelo impacto de duas lâminas de água entre si (Figura 2.11.).



Figura 2.11. - Barragem da Aguieira, sistema de dissipação por jactos cruzados

É possível, também, utilizar várias configurações de coxim do trampolim do salto de esquí (Figura 2.12.) com intenção de influenciar quer a direcção e alcance do jacto (fundamentais para orientação do jacto face às características geomecânicas do fundo e das margens, porventura diferentes) quer o grau de desintegração do jacto resultante, sendo eles os seguintes:

- a) Tipo 1 – Trampolim com coxim horizontal, caso mais comum onde o jacto é dirigido na direcção do eixo do descarregador e permanece razoavelmente compacto;
- b) Tipo 2 – Trampolim com coxim lateralmente inclinado onde o jacto é desviado lateralmente e ao mesmo tempo sofre dispersão vertical;
- c) Tipo 3- Trampolim com coxim lateralmente inclinado onde, segundo a curvatura, o jacto sofre dispersão vertical (curvatura côncava) ou lateral (curvatura convexa);
- d) Tipo 4 – Trampolim com coxim com reentrância central de suave curvatura que irá evitar a formação de ressalto por drenagem do coxim para pequenos caudais;
- e) Tipo 5 – Trampolim com coxim com obstáculos longitudinais de fraccionamento para modificação do ângulo de saída do salto de esquí, o jacto torna-se menos compacto na direcção vertical o que irá reduzir o seu poder erosivo no instante de impacto com o leito a jusante do aproveitamento;
- f) Tipo 6 – Trampolim com coxim com dentes de dissipação onde a forma dos dentes (por exemplo, forma de cone) irá afectar a trajectória e geometria do jacto resultante;
- g) Tipo 7 – Trampolim com coxim com ranhuras longitudinais, raramente utilizado para escoamento afogado no trampolim do salto de esquí de forma a evitar que se verifique apenas uma queda do escoamento para o leito a jusante do aproveitamento.

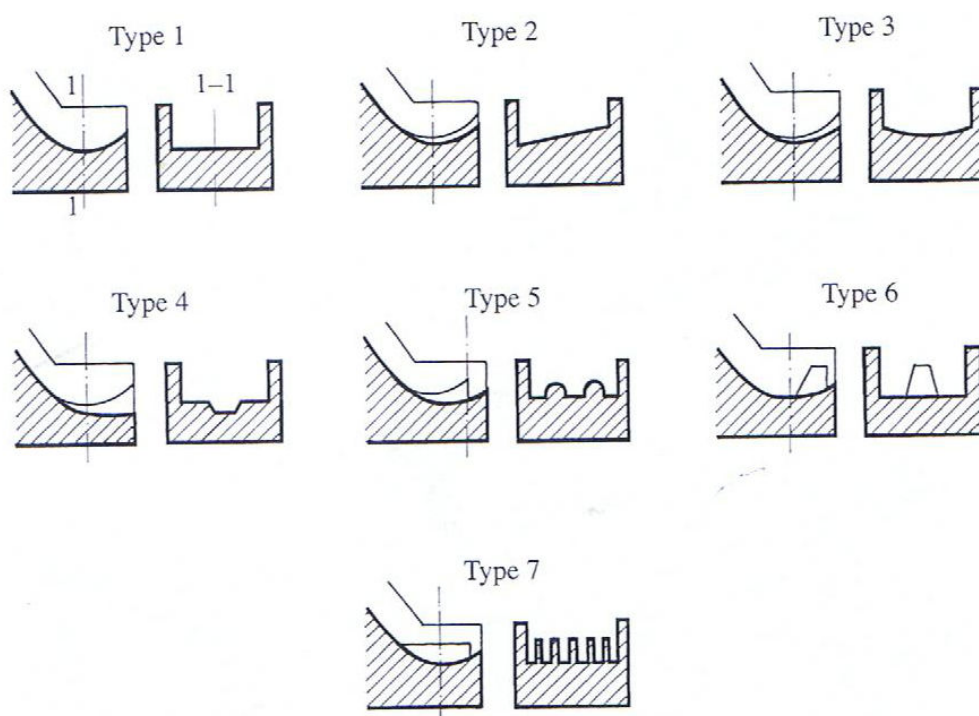


Figura 2.12. - Diferentes tipos de coxins realizados, adaptado de Hager [36]

Existem dois tipos de escoamentos passíveis de ocorrer na extremidade de jusante de um descarregador com trampolim em salto de esquí. O primeiro caso aparece para caudais descarregados bastante menores que o caudal de dimensionamento do órgão descarregador e manifesta-se através da ocorrência de um ressalto hidráulico situado na extremidade inferior da concavidade originando-se um certo afogamento desse ressalto como se vê na figura 2.13. No segundo caso, mais conhecido por jacto livre (escoamento desafogado – Figura 2.14.), o jacto é projectado verdadeiramente para o ar atingindo a zona de impacto localizada mais a jusante, sendo este caso mais favorável relativamente à estabilidade do aproveitamento já que as erosões se situarão em zonas mais afastadas do referido aproveitamento.

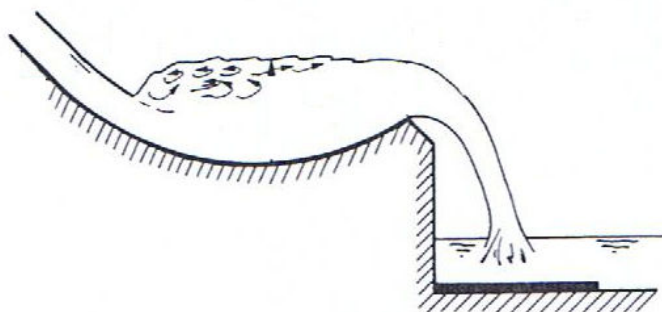


Figura 2.13. - Escoamento afogado no salto de esquí

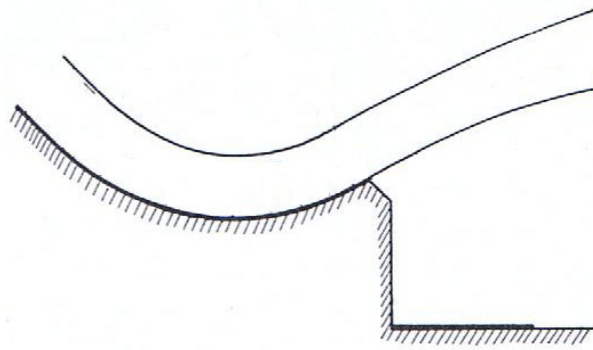


Figura 2.14. - Escoamento livre no salto de esqui

O estudo de uma dissipação de energia por jactos obrigará por um lado à análise da zona onde o impacto do jacto irá ocorrer, ou seja, qual o alcance do jacto para estudo das suas características e por outro lado à estimativa das dimensões da fossa de erosão que se espera ocorrer, com a finalidade de prevenir problemas relativos à estabilidade da estrutura, do leito do curso de água e das suas margens.

2.2.5.1. Alcance e ângulos de incidência teóricos

A equação que traduz a trajetória do jacto, tendo apenas em conta considerações de ordem cinemática é:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \theta - \frac{g \cdot \sec^2 \theta}{2 \cdot U_0^2} \cdot x^2 \quad (2.1.)$$

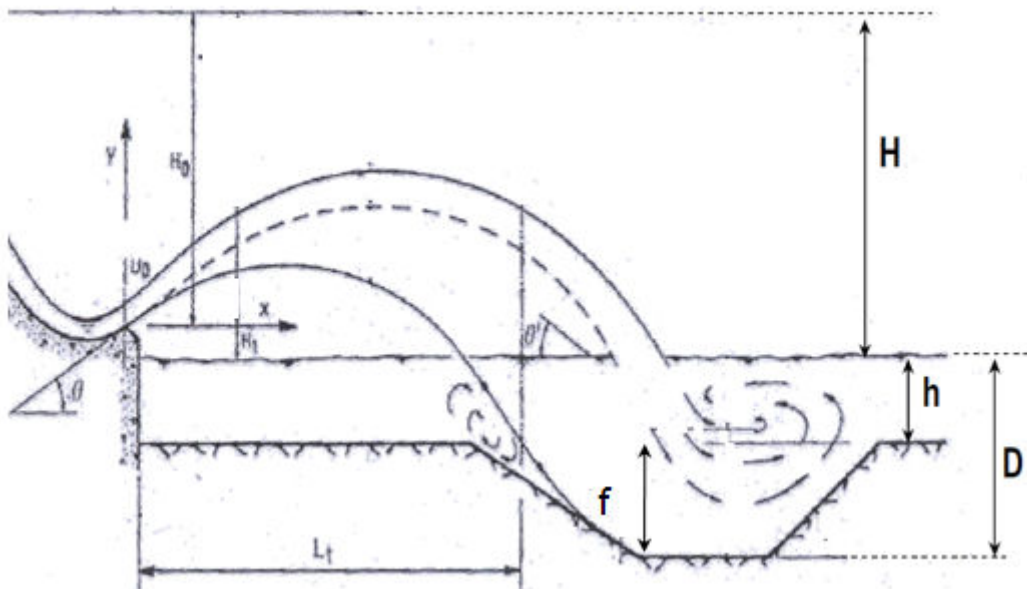


Figura 2.15. - Alcance do jacto, adaptado de Lencastre [44]

Tendo em conta as variáveis presentes na figura 2.15. e a expressão (2.1.) é possível escrever:

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

Onde,

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

A figura 2.16. representa a tradução gráfica da expressão (2.2.), que permite, fixado o valor do quociente H_0/H e do ângulo de saída do trampolim em salto de esquí, obter o valor quociente L_t/H_0 e consequentemente o valor do alcance teórico do jacto.

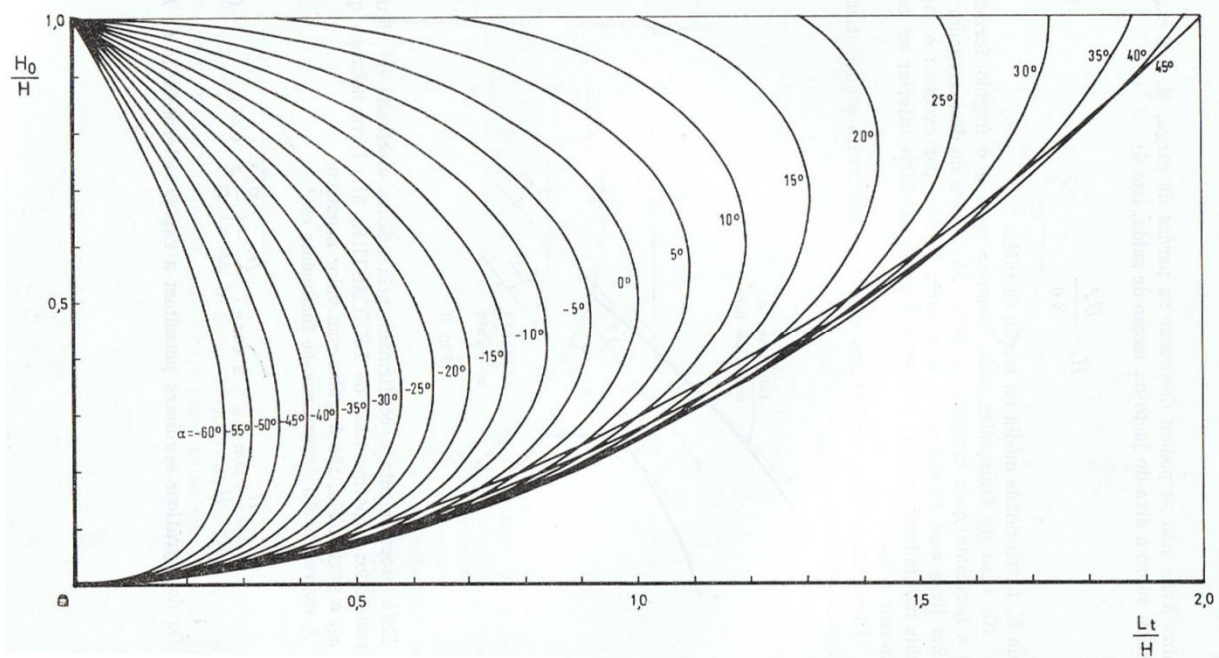


Figura 2.16. - Alcance teórico do jacto, retirado de Martins [25]

Recorrendo às expressões (2.1.) e (2.2.) poderá obter-se a do ângulo de incidência teórico θ' do jacto com o colchão de água a jusante:

$$\tan \theta' = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{H_1}{H_0}} \quad (2.4.)$$

Que à semelhança da expressão (2.2.) pode ser representado graficamente pela figura seguinte, onde os parâmetros a considerar serão de novo o valor do quociente H_0/H e o ângulo de saída do trampolim em salto de esquí, θ .

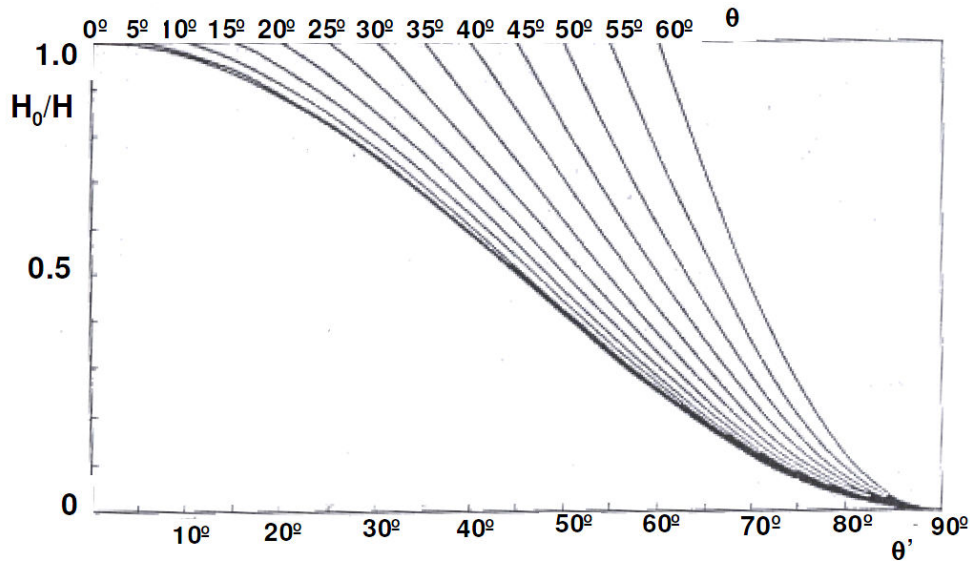


Figura 2.17. - Determinação do ângulo teórico de incidência, retirado de Martins [25]

Da análise das expressões (2.2.) e (2.4.) é possível chegar às seguintes conclusões:

- a) Tomando como fixos H_0 e H_1 , o ângulo de saída θ que torna o alcance teórico máximo é dado por:

$$\text{sen}^2\theta = \frac{H_0}{H_1 + 2 \cdot H_0} \quad (2.5.)$$

- b) Fixando H e θ e admitindo que H não varia com a localização da saída do jacto, por via de diferentes valores de perdas de energia, a colocação altimétrica da secção de saída do jacto que irá tornar o alcance teórico máximo é dada por:

$$Z_{\text{ótimo}} = \frac{H \cdot (1 + \text{sen}\theta)}{2 \cdot \cos^2\theta} \quad (2.6.)$$

- c) Sendo H_1 nulo, o ângulo de impacto tomará o mesmo valor do ângulo de saída;
d) Se H_0 e H_1 forem constantes então, dois ângulos θ do mesmo valor absoluto mas com sinais contrários conduzem ao mesmo ângulo θ' .

Voltando agora a análise para as expressões (2.5.) e (2.6.) conclui-se facilmente que:

- a) θ vale, no máximo, 45° e o seu valor tende para zero com o aumento de H_1/H_0 ;
b) Quando θ varia entre 0° e 30° o alcance máximo é atingido para valores de H_0 entre $H/2$ e H ;
c) Para θ superior a 30° o alcance é tanto maior quanto mais H_0 se aproximar de H .

2.2.5.2. Alcance efectivo

Embora se reconheça a maior importância do alcance teórico do jacto para a delimitação de uma bacia de dissipação será também importante estudar o alcance efectivo do jacto que será igual ou menor que o teórico.

A existência de dissipação de energia ao longo do percurso do jacto leva-o a percorrer uma trajectória diferente da traduzida pela expressão (2.1.), no caso de jactos ascendentes. No caso dos jactos descendentes a fórmula referida possui precisão suficiente.

Acerca deste ponto vários autores apontam uma concordância entre os valores efectivos de alcance dos jactos com os valores teóricos. Autores como Smith [1], Solov'eva [2] e Yuditskii [3] chegaram a essa conclusão, assim como Escande [4] mesmo para jactos emulsionados e relativamente desintegrados.

No entanto, existem outros autores que, nos seus estudos, propõem que o alcance efectivo seja considerado inferior ao teórico. Esta aproximação revela-se preferível já que, considerar em projecto a fossa de erosão mais próxima da obra irá actuar no sentido da segurança. No grupo de autores que defendem esta segunda ideia encontram-se Horeni [5] que indica que a velocidade no impacto a jusante será cerca de 6% inferior à teórica podendo assim calcular a equivalente redução no alcance através da expressão (2.2.), Peterka [6] que, através da observação de um número relativamente baixo de protótipos a funcionarem com caudais reduzidos (cerca de 20% do caudal de dimensionamento), estima a redução do alcance efectivo em relação ao teórico em cerca de 15 a 20% afirmando, no entanto, que essa diferença diminui quando o caudal aumenta e por fim uma monografia do Bureau of Reclamation [7] propõe a redução de H_0 em 10%.

Para o cálculo do alcance efectivo, L , dos jactos provenientes de trampolins, sem acessórios, foram desenvolvidos métodos empíricos e semi-empíricos que permitissem a correcção do valor teórico.

Gun'ko et al [8] apresenta o gráfico da figura 2.18. que permite determinar o quociente entre L e L_t para diferentes valores do número de Froude na secção de saída, em que para este autor:

$$Fr = \frac{U_0^2}{g \cdot h_0} \quad (2.7.)$$

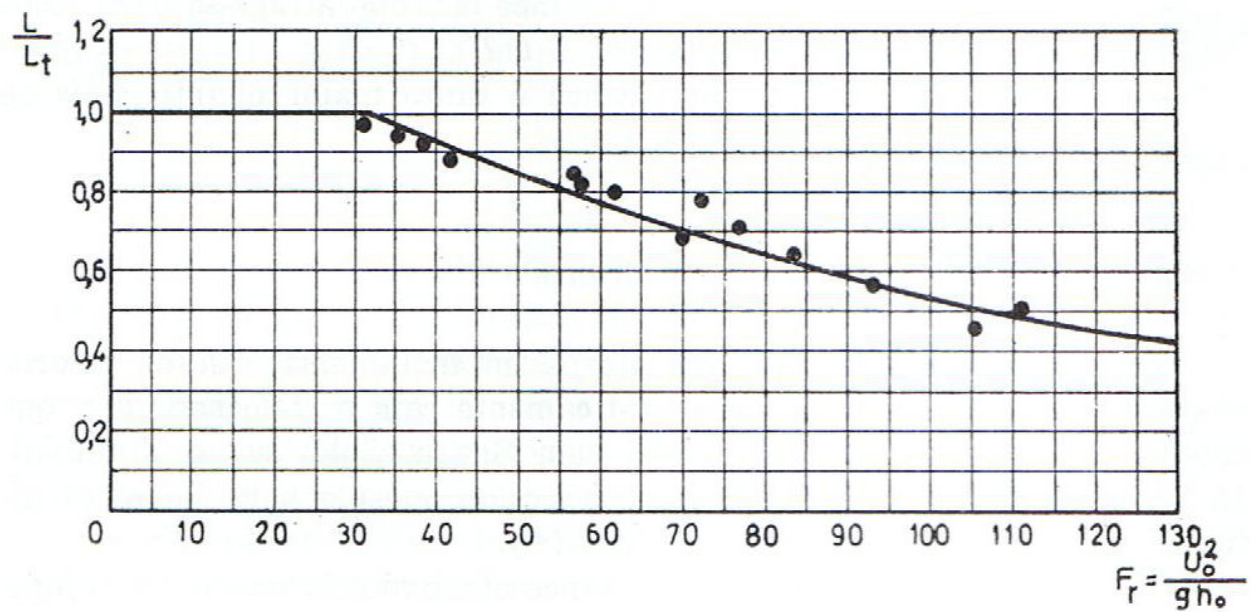


Figura 2.18. - Determinação do alcance efectivo do jacto, retirado de Martins [25]

O gráfico da figura 2.18. só é válido para δ menor que 0,55 na secção terminal do salto de esqui, δ poderá ser aproximadamente estimado pela expressão seguinte, resultante de experiências em protótipo:

$$\delta = K_r \cdot \sqrt{Fr - 45} \quad (2.8.)$$

Onde, K_r [8] é um factor de rugosidade que, para descarregadores de betão, toma valores entre 0,07 e 0,075.

Pela análise do gráfico anterior é visível que, para números de Froude, à saída do salto de esqui, relativamente baixos, o alcance teórico é uma aproximação suficientemente precisa do alcance efectivo.

Também Kawakami [9] apresenta uma proposta de correcção do alcance teórico para determinação do alcance efectivo mas desta vez dependendo da velocidade de saída U_0 (Figura 2.19.).

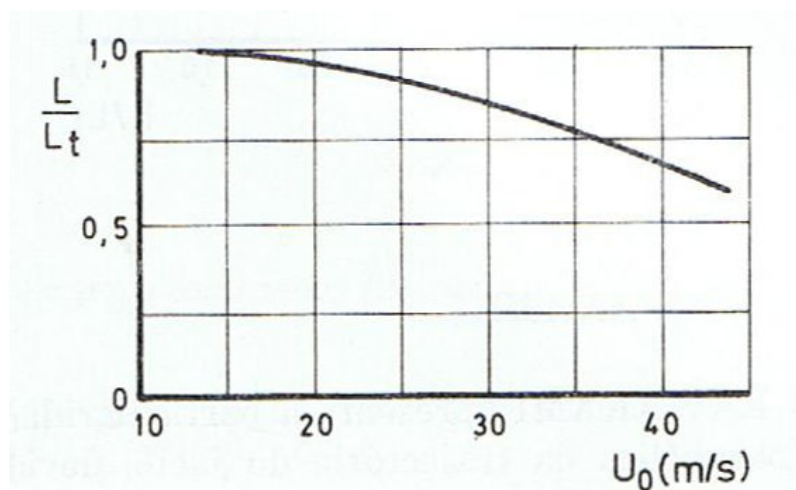


Figura 2.19. - Alcance efectivo do jacto por Kawakami, retirado de Martins [25]

Zvorykin et al [10] apresenta uma expressão empírica não homogénea que permite a determinação da distância desde a extremidade do trampolim até à zona mais a jusante onde se dá a queda do jacto, ou seja, o alcance efectivo máximo.

$$L = 0,59 \cdot 1,53^{\log q} \cdot H'_0 \cdot \sin 2\theta + 1,3 \cdot H_1 + 16 \quad (2.9.)$$

O autor refere que a fórmula foi obtida para os seguintes intervalos das variáveis envolvidas, sendo razoável afirmar que a expressão (2.9.) não deve ser aplicada para valores fora destes intervalos:

- q : de 11 a 29,4 m²/s;
- H'_0 : de 35,7 a 93,5 m;
- θ : de 12 a 35°;
- H_1 : de 4 a 11 m.

2.2.5.3. Previsão da fossa de erosão

A maioria dos estudos realizados até à data serviu para caracterizar a acção erosiva dos jactos no leito dos rios para resolução de casos concretos, visto que tendo em conta o conhecimento actual relativamente a este assunto não é possível abordá-lo com total precisão e apenas recorrendo a critérios de projecto.

Confrontados com uma certa falta de conhecimento nesta questão, os projectistas deparam-se com uma série de contrariedades no dimensionamento e previsão do comportamento da erosão do leito do rio em projectos de grandes dimensões. Assim será imprescindível que se realizem estudos em modelo físico, após cuidadosa prospecção geológica do local onde se processa a dissipação de energia, de forma a antever a formação e evolução da fossa de erosão e até a criação de uma barra a jusante do local de impacto do jacto para várias condições de funcionamento do aproveitamento.

Deste modo, admitindo no entanto algumas dificuldades no estabelecimento de critérios gerais de exploração dos modelos com o objectivo final de obter resultados fiáveis, é seguro afirmar que os modelos físicos constituem o melhor recurso disponível ao serviço do projectista para que este possa estudar e aperfeiçoar as condições de funcionamento das obras a projectar.

No entanto, para estimar a erosão máxima produzida por acção de jactos, existem várias fórmulas de índole empírica e semi-empírica, sendo algumas delas obtidas através da observação das erosões produzidas em protótipos, em modelos físico e por vezes assentes em ambos, tendo como base alguns parâmetros hidráulicos e geológicos/geotécnicos.

Mason e Arumugam [11] referem que, tendo em conta os parâmetros considerados, existem cinco grupos de expressões que permitem calcular as erosões produzidas por jactos.

O primeiro grupo caracteriza-se por considerar que a profundidade máxima das erosões, D , depende da queda, H , do caudal por unidade de largura na secção de saída, q , e, para alguns autores das fórmulas, do diâmetro considerado característico do material do leito, d .

Neste primeiro grupo, que representa por si só a maioria das fórmulas até hoje publicadas, as expressões tomam a forma geral seguinte:

$$D = K \cdot \frac{q^x \cdot H^y}{d^z} \quad (2.10.)$$

No Quadro 2.1. expõem-se os valores dos expoentes x , y e z admitidos por vários autores identificados pela pesquisa bibliográfica realizada bem como, se aplicável, o diâmetro característico a considerar.

Quadro 2.1. - Coeficientes para aplicação da expressão 2.10.

Autor	K	x	y	z	d_i
Chian Min Wu [12]	1,18	0,51	0,235	0	-
Damle (A) [13]	0,652	0,5	0,5	0	-
Eggenberger [14]	1,44	0,6	0,5	0,4	d_{90}
Franke [15]	1,13	0,67	0,5	0,5	d_{90}
Hartung [16]	1,4	0,64	0,36	0,32	d_{85}
INCYTH [17]	1,413	0,5	0,25	0	-
Machado (A) [18]	1,35	0,5	0,3145	0,0645	d_{90}
Martins (B) [19]	1,5	0,6	0,1	0	-
Patrashev [20]	3,877	0,5	0,25	0,25	d_{90} (mm)
Schoktlisch [21]	0,521	0,57	0,2	0,32	d_{90}
Taraimovich [22]	0,633	0,67	0,25	0	-
Veronese (A) [23]	0,202	0,54	0,225	0,42	d_m
Veronese (B) [23]	1,9	0,54	0,225	0	-

Analisando o quadro anterior é visível que, independentemente do autor considerado, existe uma certa concordância do valor a atribuir ao coeficiente x , tomando valores da ordem de grandeza de 0,6. Também pelos valores considerados para este coeficiente é possível afirmar que o parâmetro mais importante a considerar será o caudal por unidade de largura. Já o coeficiente y tem maior variabilidade visto que conta com valores entre 0,1 e 0,5, estando associado ao segundo parâmetro mais importante, a queda H . Por fim o coeficiente z , associado ao parâmetro que se considera tomar menor importância sendo, por vezes, até desprezado, possui valores que variam desde 0 até 0,5. Chama-se também a atenção para o facto de, no caso de autores que consideram a influência do diâmetro característico do material do leito para o cálculo da profundidade máxima da fossa de erosão, o diâmetro característico será o d_{90} , ou seja, o diâmetro do peneiro através do qual 90% da amostra, neste caso do material do leito do rio em causa, passa. A maioria dos autores adopta d_{90} baseando-se no facto de os sedimentos de menor dimensão serem erodidos/transportados mais rapidamente, sendo a profundidade da fossa de erosão controlada mais directamente pela dimensão dos maiores sedimentos presentes no leito do rio. Hartung [16] afirma ser mais correcto definir o diâmetro característico dos sedimentos como sendo d_{85} , tendo outros autores considerado o que o diâmetro médio, d_m , será suficientemente representativo da amostra. Deve-se ter em conta que, em alguns casos, as fórmulas viram a sua expressão inicial simplificada. Factores como a densidade relativa do material foram incorporados na constante K , usando valores sugeridos, geralmente, pelos próprios autores. Factores que visam a influência do ângulo de impacto do jacto, usado em fórmulas como a de Eggenberger, foram eliminados nesta fase e retomados, mais tarde, fazendo parte de um estudo independente. Damle [13], no seu estudo, considerou tanto fossas de erosão em modelo como em protótipo. Este autor propôs três expressões que representam, respectivamente, o máximo caso possível em modelo e em protótipo, um valor médio para fossas em modelo e por fim um novo valor médio, mas neste caso para fossas em protótipo. Neste trabalho só se apresentam os coeficientes para aplicação da fórmula que prevê o valor máximo expectável.

O segundo grupo de fórmulas caracteriza-se por considerar, para além dos parâmetros já abordados no primeiro grupo, a espessura do colchão de água a jusante, h . Deste grupo fazem parte as seguintes expressões:

a) Jaeger [24]:

$$D = 0,6 \cdot q^{0,5} \cdot H^{0,25} \cdot \left(\frac{h}{d_m}\right)^{0,333} \quad (2.11.)$$

b) Martins (A) [25]:

$$D = 0,14 \cdot N - 0,73 \cdot \frac{h^2}{N} + 1,7 \cdot h \quad (2.12.)$$

$$N = \sqrt[7]{\frac{Q^3 \cdot H^{3/2}}{d_{90}^2}} \quad (2.13.)$$

c) Mason e Arumugam (A) [26]:

$$D = 3,27 \cdot \frac{q^{0,6} \cdot H^{0,05} \cdot h^{0,15}}{g^{0,3} \cdot d_m^{0,1}} \quad (2.14.)$$

$$d_m = 0,25 \text{ m}$$

d) Mason e Arumugam (B) [26]:

$$D = K \cdot \frac{q^x \cdot H^y \cdot h^{0,15}}{g^{0,3} \cdot d_m^{0,1}} \quad (2.15.)$$

$$K = 6,42 - 3,1 \cdot H^{0,1} \quad (2.16.)$$

$$x = 0,6 - \frac{H}{300} \quad (2.17.)$$

$$y = 0,15 + \frac{H}{200} \quad (2.18.)$$

$$d_m = 0,25 \text{ m}$$

e) Rubinstein [27]:

$$D = h + 0,19 \cdot \left(\frac{H + h}{d_{90}} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{q^{1,2}}{H^{0,47} \cdot h^{0,33}} \right) \quad (2.19.)$$

f) Ghodsian [28]:

$$D = 0,75 \cdot h \cdot \left(\frac{q}{(h^3 \cdot g)^{0,5}} \right)^{0,524} \cdot \left(\frac{d_m}{h} \right)^{0,366} \cdot \left(\frac{H}{h} \right)^{0,255} \quad (2.20.)$$

O terceiro grupo cinge-se a uma série de fórmulas simplificadas que possuem uma abordagem demasiadamente simplista do problema, de seguida apresenta-se o caso da fórmula de Davis-Sorensen [29] que apenas considera o parâmetro H como variável na fórmula:

$$D = \frac{2}{3} \cdot H \quad (2.21.)$$

Por seu lado, o quarto grupo, notoriamente marcado pela escola Russa, inclui também a influência do ângulo de incidência do jacto, θ' , com o colchão de água a jusante. As fórmulas do quarto grupo são, geralmente, bastante mais complexas do que as outras definidas até agora, no entanto, muitas das expressões deste grupo dependem bastante de julgamento subjectivo ou estão definidas de maneira pouco precisa. Apenas as fórmulas de Mikhalev, Rubinstein e a primeira fórmula de Mirtskhulava podem ser aplicadas com um maior grau de confiança relativamente às restantes expressões que constituem este grupo.

Aqui, referem-se as seguintes expressões:

a) Mikhalev [30]:

$$D = \left(\frac{1,804 \cdot q \cdot \sin\theta}{1 - 0,215 \cdot \cot\theta'} \right) \cdot \left(\frac{1}{d_{90}^{0,33} \cdot h^{0,5}} - 1,126 \cdot H \right) \quad (2.22.)$$

b) Mirtskhulava (A) [31]:

$$D = 0,25 \cdot h + \left(\frac{0,97}{d_{90}^{0,5}} - \frac{1,35}{H^{0,5}} \right) \cdot \left(\frac{q \cdot \sin\theta'}{1 - 0,175 \cdot \cot\theta'} \right) \quad (2.23.)$$

c) Mirtskhulava (B) [31]:

$$D = 0,25 \cdot h + \left(\frac{3 \cdot \eta \cdot U_0 \cdot b_0}{W} - 7,5 \cdot b_0 \right) \cdot \left(\frac{\sin\theta'}{1 - 0,175 \cdot \cot\theta'} \right) \quad (2.24.)$$

$$\eta = 2 \rightarrow \text{protótipo} \cup \eta = 1,5 \rightarrow \text{modelo}$$

$$b_0 = \frac{0,8 \cdot q}{U_0} \quad (2.25.)$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\gamma_s - \gamma_0) d_{90}}{1,75 \cdot \gamma_0}} \quad (2.26.)$$

Na publicação referida o autor não fornece qualquer indicação sobre o modo de estimar γ_0 em função do grau de emulsão, mas noutra publicação do mesmo autor [32] é apresentada a expressão seguinte para velocidades U_0 entre 5 m/s e 25 m/s:

$$\gamma_0 = \left(1 - 0,18 \cdot U_0^{2/5}\right) \cdot \gamma \quad (2.27.)$$

As expressões (2.24.) e (2.26.) são válidas para ângulos de saída do salto de esqui superiores ou iguais a 15° e d_{90} superior a 2 mm. Para este diâmetro ou menores as profundidades D obtidas devem ser corrigidas pelo factor n_1 , obtido experimentalmente, e traduzido pela expressão seguinte (d_{90} em mm):

$$n_1 = 0,42 \cdot \sqrt{d_{90}} \quad (2.28.)$$

d) Yildiz e Uzupek (método de Veronese modificado) [33]:

$$D = 1,9 \cdot q^{0,54} \cdot H^{0,225} \cdot \cos\theta' \quad (2.29.)$$

Por fim, o quinto grupo a considerar agrega um conjunto de expressões que ponderam a influência do tempo de descarga do aproveitamento e, portanto, o tempo de actuação do jacto no leito do rio.

Para os testes realizados em modelo poderem ser usados como uma forma credível de previsão da profundidade máxima de fossas de erosão é necessário, como é natural, assumir uma relação entre modelo e protótipo. Os autores das diversas fórmulas existentes utilizaram modelos que obedeciam à semelhança de Froude. Isto terá implicações relativamente ao valor dos expoentes x , y e z das fórmulas do primeiro grupo e aos expoentes x , y , w e z das fórmulas do segundo grupo. Assim, demonstrou-se que será necessário para as fórmulas do primeiro grupo que:

$$1,5 \cdot x + y - z = 1 \quad (2.30.)$$

E que para as do segundo grupo teríamos:

$$1,5 \cdot x + y + w - z = 1 \quad (2.31.)$$

Para algumas das fórmulas até agora expostas foram encontrados os limites de aplicação das mesmas, o que poderá justificar, futuramente, a concordância, ou não, dos resultados obtidos em modelo físico. Esses limites encontram-se expostos na figura 2.20. que a seguir se reproduz.

Investigator	d (mm)	h (m)	H (m)	U m/s	q (m ² /s)	θ' (rad)
Schoklitsch (1932)	0.5-15	–	0.06-0.32	–	0.009-0.07	–
Doddiah et al. (1953)	4.8-12	0.04-0.31	0.14-1.19	–	0.011-0.05	–
Hartung (1957)	2.5-9.7	–	0.01-0.14	–	0.006-0.037	–
Damle et al. (1966)	–	1.5-4.3	27.3-50.5	–	7.7-22.1	0.5-0.8
Kotoulas (1967)	5.2-25	–	0.20-0.40	–	0.02-0.08	–
Smith (1967)	0.64-2.8	0.03-0.18	0.05-0.15	–	0.004-0.08	–
Taraimovich (1978)	–	4.7-40	14.3-225	–	33.5-137	0.7-1.1
Chividini et al. (1982)	0.3-16	0.05-0.32	0.53-2.0	–	0.012-0.22	–
Rajaratnam (1982) ¹	1.2-2.4	0.01-0.02	–	2.4-3.6	0.006-0.009	1.56
Mason (1983)	1-41	0.03-42	0.33-109	–	0.009-220	0.4-1.5
Yuen (1984)	8.7	0.27-0.64	–	3.8-5.2	0.099-0.129	0.8-1.6
Bormann & Julien (1991)	0.3-1.7	0.24-1.65	–	0.9-4.7	0.290-2.47	0.1-1.0
Stein et al. (1993)	0.1-2.1	–	–	0.7-1.2	0.002-0.005	0.5-1.0
Chen & Lu (1995)	6.7-22	0.04-0.08	0.09-0.14	–	0.018-0.040	–

Figura 2.20. - Limites de aplicação de fórmulas, adaptado de Hoffmans [39]

Faz-se notar que, no quadro presente na figura 2.20., os limites apresentados dizem respeito tanto a valores em modelo laboratorial como em protótipo (por exemplo, valores da queda H variam entre 0,05 m e 225 m).

Como foi visto, as fórmulas do segundo grupo têm em conta a influência da espessura do colchão de água na zona de impacto dos jactos. Esta fica então sujeita às acções dinâmicas do jacto, devendo ser protegida, por exemplo, por um colchão de água que irá amortecer essas acções. O estudo de Lencastre ([34] e [44]) mostra que a erosão verificada na zona de impacto dos jactos não se deve aos valores médios dos esforços do jacto sobre o leito, mas sim às flutuações turbulentas desses esforços. Estas flutuações poderão actuar tanto no sentido ascendente como descendente, interessando apenas o primeiro para o fenómeno em estudo, visto que serão estas flutuações ascendentes que provocarão o levantamento do material e correspondente erosão. Outra conclusão retirada deste estudo será que o aumento da espessura do colchão de água a jusante irá actuar no sentido de atenuar as referidas flutuações turbulentas. O colchão de água poderá resultar das características de vazão do curso de água ou poderá também ser provocado pela construção de um açude a jusante, ou até abrindo uma fossa previamente preparada na zona de impacto do jacto. A abertura de uma fossa na zona de impacto afigura-se vantajosa já que, desta forma, será possível economizar na quantidade de betão utilizado no aproveitamento (eliminação de bacia de dissipação) e também irá permitir a utilização do material retirado do leito do rio na construção da barragem. No entanto, deverá atender-se a alguns factores de segurança e operacionalidade do aproveitamento na decisão da abertura, ou não, de uma fossa na zona de impacto como por exemplo, as implicações em termos de segurança da barragem e da estabilidade das margens. Se nenhuma destas soluções for suficiente, deverá então proteger-se a zona de impacto com obra de dissipação de energia.

2.2.5.4. Ensaio em modelo físico

Como se referiu, os modelos físicos são um dos recursos mais valiosos ao serviço do projectista para análise, caso a caso, das soluções projectadas, neste caso em termos de evolução da fossa de erosão. De facto, através desta ferramenta e, através de uma reprodução, o mais fiel possível, das condições hidráulicas e geológicas do protótipo, é possível analisar, com razoável precisão, as erosões provocadas não só pela acção directa do jacto no leito do rio, mas também reproduzir com satisfatória aproximação as complicadas condições de escoamento.

No entanto, os resultados obtidos através dos modelos físicos apresentarão limitações que terão que ser tidas em conta na análise dos resultados nos ensaios realizados. Por exemplo, as escalas normalmente utilizadas não permitirão reproduzir as condições de arrastamento e emulsão de ar no escoamento, factor esse que é atenuante das acções hidrodinâmicas logo, atenuante também da capacidade erosiva do escoamento. Novamente devido às escalas utilizadas para construção dos modelos não é exequível reproduzir a fragmentação dos blocos, o mesmo acontece com as dimensões dos materiais utilizados nos leitos dos rios que, por vezes, não será possível cumprir o princípio de semelhança do modelo sem alterar outras propriedades do material o que poderá desvirtuar as conclusões obtidas. Refere-se ainda os elevados custos da realização dos ensaios em modelo físico reduzido.

Como resumo, poderá dizer-se que a adequada construção do modelo, selecção do material para o fundo móvel, realização dos ensaios e apreciação dos resultados será vital para a qualidade final do trabalho realizado.

3

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

3.1. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

Os ensaios experimentais relativos a esta dissertação foram levados a cabo nas instalações do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Foi utilizada uma instalação já existente na qual estava integrado um descarregador de degraus (Figura 3.1.).



Figura 3.1. - Vista geral do descarregador de degraus

A referida instalação (Figura 3.2.), que funciona em circuito fechado, é constituída essencialmente por dois reservatórios de alimentação (Figura 3.3.) de onde a água é bombada e introduzida no conjunto de tubagens que a conduzirá a um pequeno reservatório de tranquilização (Figura 3.4.) colocado a montante do descarregador, sendo, quando atingida a secção a jusante deste, conduzida por um canal onde se realiza a restituição (Figura 3.5.) a um reservatório de recolha do qual é bombado, por meio de uma bomba submersível (Figura 3.6.), para os reservatórios de alimentação inicialmente referidos.

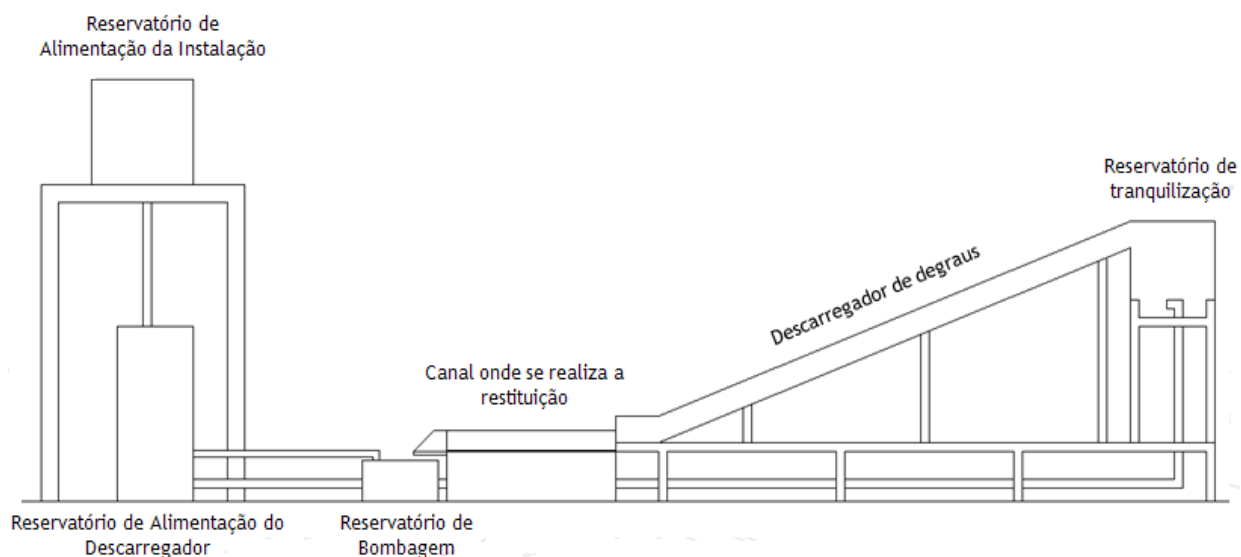


Figura 3.2. - Esquema da instalação experimental utilizada



Figura 3.3. - Sistema de alimentação da instalação constituído pelos reservatórios 1 (Reservatório de Alimentação da Instalação) e 2 (Reservatório de Alimentação do Descarregador)

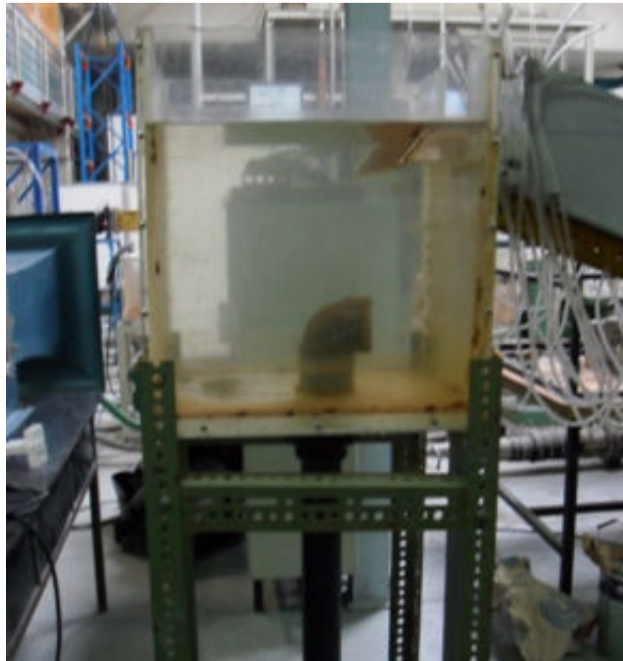


Figura 3.4. - Reservatório de tranquilização

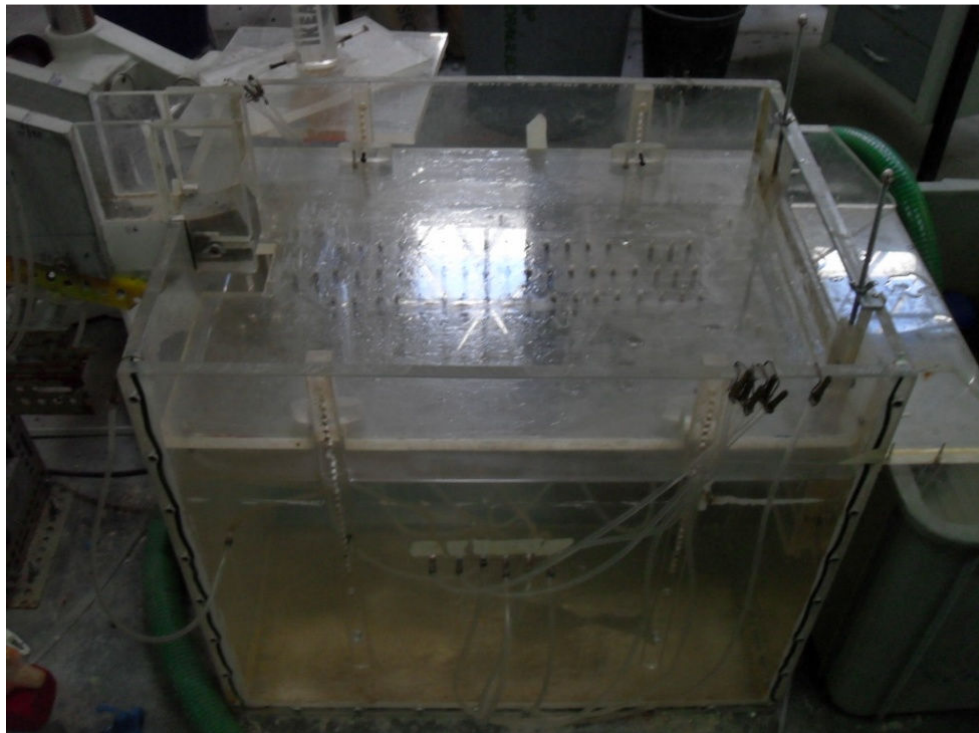


Figura 3.5. – Canal onde se realiza a restituição a jusante do descarregador



Figura 3.6. - Reservatório de Bombagem com bomba submersível

O descarregador utilizado é composto por vinte e seis degraus, cada um com 3,75 cm de altura, tendo um comprimento total de cerca de 2,60 metros e 0,90 metros de altura. É um descarregador do tipo convergente cuja largura se reduz de 15 cm na secção inicial até 5 cm na secção intermédia, sendo mantida constante a partir daí até à secção de jusante.

Para o estudo do sistema de dissipação de energia foram preparados modelos de trampolim em salto de esqui com ângulos de saída de 20°, 30° e 45° realizados em betão, para aplicação na extremidade de jusante do descarregador. Faz-se notar que nos ensaios desta dissertação, devido à falta de disponibilidade de tempo, apenas foi possível utilizar o trampolim com ângulo de 20° (Figuras 3.7. e 3.8.).

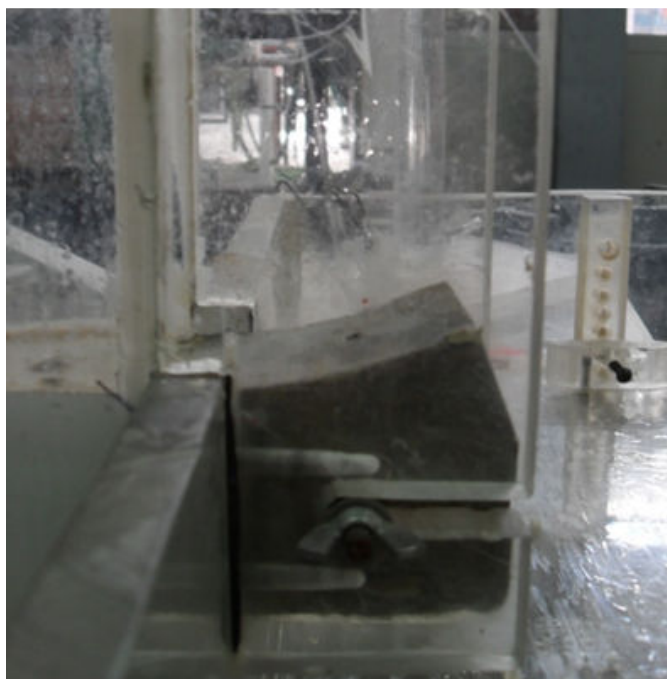


Figura 3.7. - Trampolim em salto de esqui aplicado

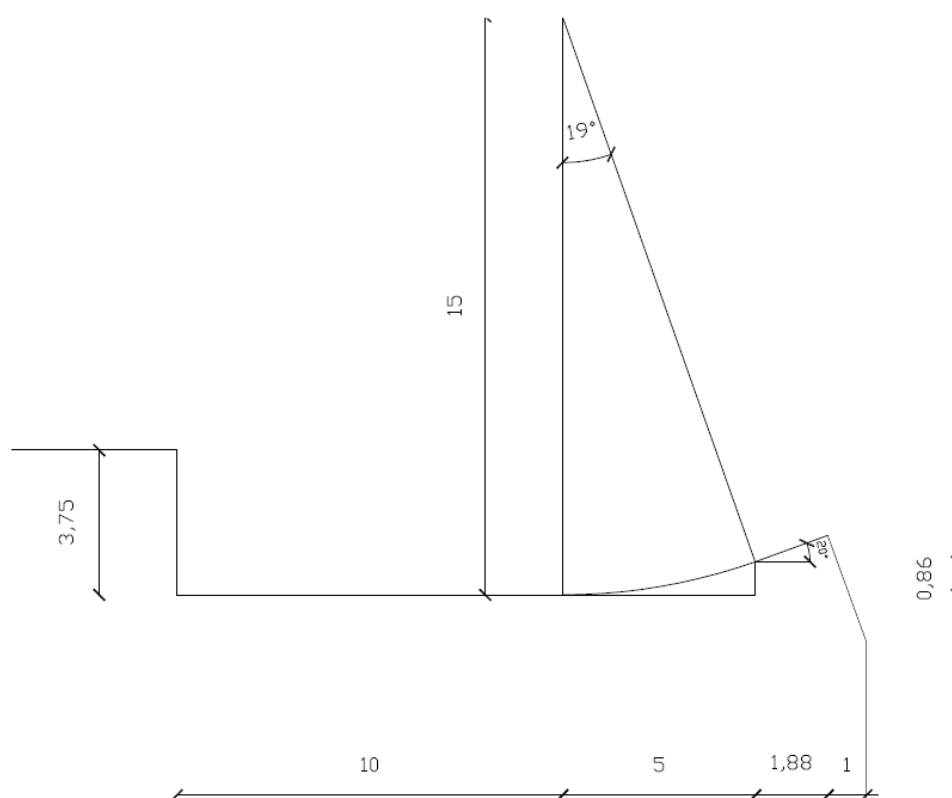


Figura 3.8. - Esquema do trampolim em salto de esqui utilizado (medidas em centímetros)

A simulação da zona de restituição a jusante do descarregador foi feita construindo um canal de restituição com as seguintes dimensões: 67,2 cm de comprimento, 50,5 cm de largura e 58,5 cm de altura. Este canal está provido no seu interior de uma placa de perspex horizontal amovível que funciona como fundo, permitindo simular várias posições do leito do curso de água em relação ao lábio do trampolim em salto de esqui. Os ensaios do presente trabalho desenvolver-se-ão, como já foi referido, considerando duas situações para o fundo do canal de restituição correspondentes relativamente a fundo fixo e a fundo móvel o qual será, neste estudo, constituído por material granular não coerente. No primeiro caso a placa de perspex, equipada com tomadas de pressão (Figuras 3.9. e 3.10.), permitirá a análise de pressões nessa superfície. No segundo caso o nível da placa amovível será rebaixado para permitir colocar uma camada de material granular não coerente com a espessura desejada e de tal forma que o seu nível superior (simulando o leito do curso de água) coincida com o nível do fundo fixo anteriormente considerado.



Figura 3.9. - Placa de perspex representativa do fundo fixo

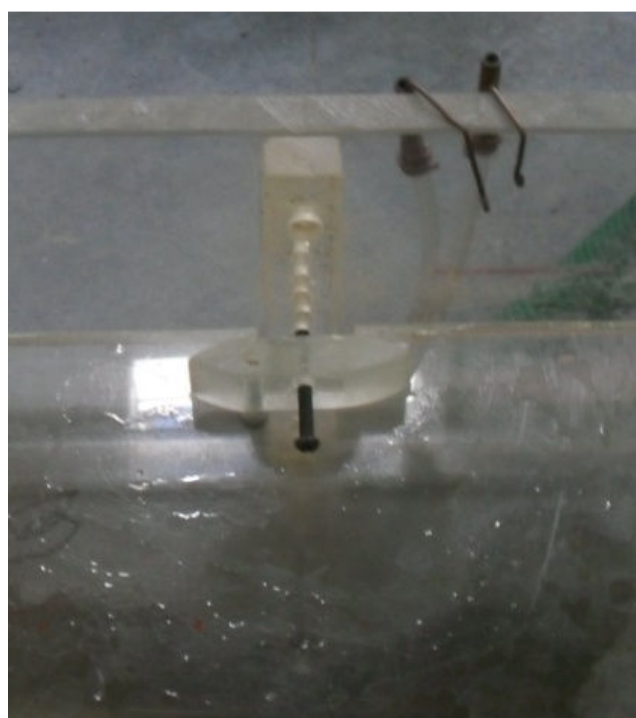


Figura 3.10. - Pormenor dos pontos de apoio da placa de fundo regulável

O nível de água no canal de restituição é variável de acordo com o desejado sendo o seu controlo realizado através da movimentação de um descarregador de parede delgada, situado na secção de jusante desse canal e cujo nível da crista pode ser facilmente ajustado para controlo da vazão (Figura 3.11.). Pretende-se, desta forma, simular o efeito do designado dente de contra-embalse no protótipo.

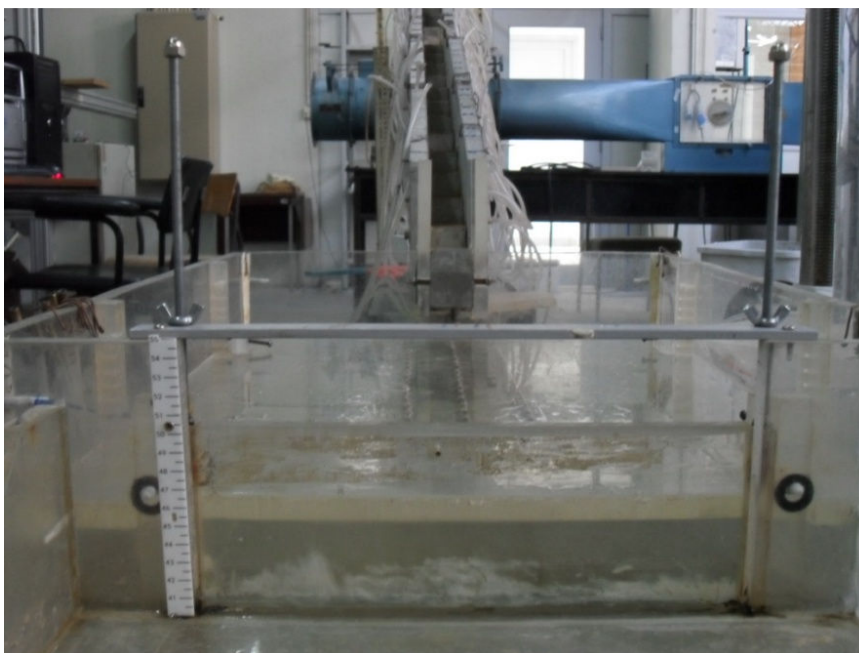


Figura 3.11. - Pormenor do descarregador de parede delgada regulável

3.2. MODELO DE SEMELHANÇA UTILIZADO

Os dois componentes do modelo, descarregador em degraus e trampolim em salto de esqui, foram construídos à escala geométrica 1:40, utilizando a semelhança de Froude que, de entre as seis forças encontradas nos fenómenos dos escoamentos, forças de inércia, de viscosidade, de gravidade, de pressão, de tensão superficial e de compressão elástica, considera como forças predominantes as forças de gravidade. Assim, considera-se como não relevante a influência das outras forças referidas.

O número de Froude é dado pela razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade, em escoamentos em canal com superfície livre. Assim:

$$Fr = \frac{\text{Forças Inércia}}{\text{Forças Gravidade}} \quad (3.1.)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h_0}} \quad (3.2.)$$

Sendo utilizado o mesmo fluido no modelo e no protótipo, os quais são sujeitos ao mesmo campo gravitacional de forças, as razões de escalas para as diversas grandezas físicas podem ser estabelecidas igualando o número de Froude no modelo ao do protótipo, obtendo assim as seguintes razões:

Quadro 3.1. - Algumas razões de escala segundo a lei de Froude

Razões de escala segundo a lei 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 unitário por largura - $\lambda_L^{3/2}$	Potência - $\lambda_L^{7/2}$

3.3. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL UTILIZADO NOS ESTUDOS EM FUNDO MÓVEL

Nos ensaios realizados com fundos móveis foi utilizado um material granular não coerente cuja curva granulométrica se apresenta na figura 3.12., com peso específico de cerca de 16,5 kN/m³ para realização de um leito com espessura de 10 cm. Os restantes elementos da análise granulométrica realizada encontram-se no anexo I.

Representação gráfica dos resultados

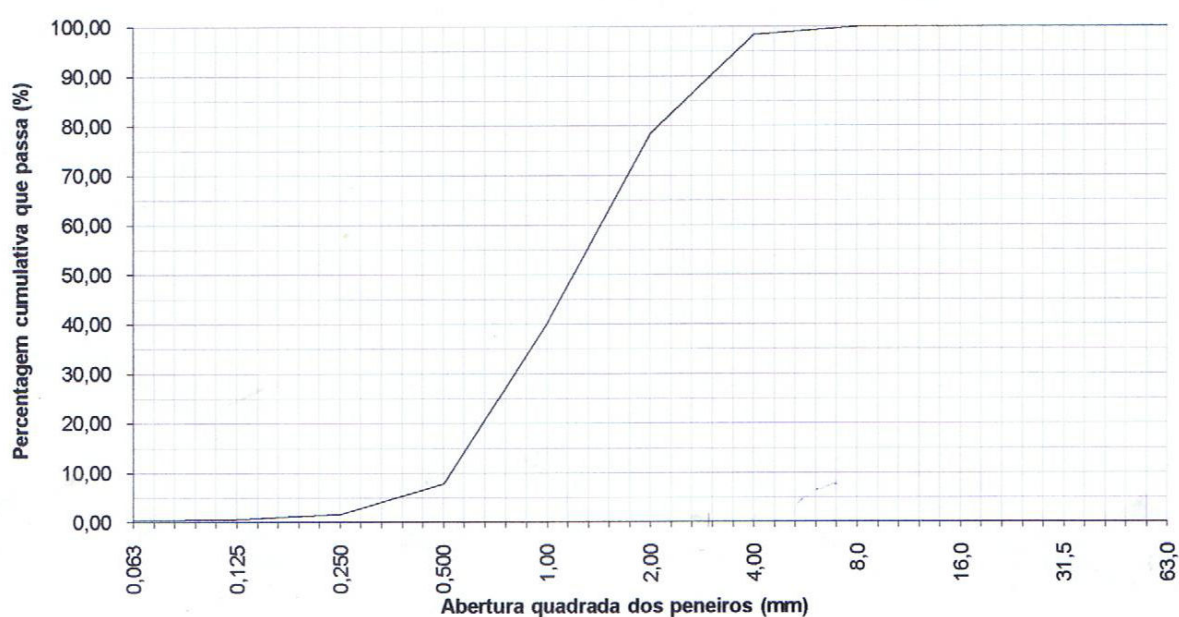


Figura 3.12. - Curva granulométrica do material granular não coerente utilizado nos ensaios de fundo móvel

3.4. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Os ensaios necessários ao estudo da dissipação de energia a jusante do descarregador de degraus munido de um trampolim em salto de esqui requereram a medição de caudais, de alturas de água no lábio do trampolim para determinação da velocidade de saída e posterior cálculo de alcance teórico de jactos, registo de trajectórias reais de jactos, medição de pressões médias e flutuações de pressão no leito do canal de restituição e definição de fossas de erosão em fundo móvel. Para medição destes parâmetros foi necessário dispor de equipamentos de medição adequados que a seguir se descrevem.

3.4.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS

A avaliação dos caudais foi efectuada com recurso a um equipamento de medição de caudais, do tipo electromagnético, (Figura 3.13.) instalado na tubagem de adução de água ao reservatório de tranquilização situado a montante do descarregador. O medidor de caudal da marca Fisher & Porter, modelo MAG-XE, permite a leitura directa no seu visor, dos caudais escoados. No entanto, para uma maior facilidade e exactidão na obtenção dos dados necessários foi feita a sua ligação a um sistema de aquisição de dados posteriormente descrito.



Figura 3.13. - Equipamento do tipo electromagnético para medição de caudais

3.4.2. MEDIÇÃO DE PRESSÕES MÉDIAS NO FUNDO DO CANAL DE RESTITUIÇÃO

Para uma melhor compreensão do fenómeno da dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional que se encontra munido de um trampolim em salto de esquí considerou-se necessário fazer o levantamento de um campo de pressões médias na zona de impacto dos jactos, durante esse impacto e para diferentes condições de escoamento quer no que se refere a caudais descarregados quer às alturas do colchão de água na zona desse impacto. No estudo foi utilizada a placa de perspex, apresentada na figura 3.6., equipada, como já foi referido, com várias tomadas de pressão. Considerou-se que o referido fundo fixo estaria a uma distância de 10 cm do lábio do trampolim em salto de esquí.

Para determinação das pressões médias no leito foi utilizado um transdutor diferencial de pressão (Figura 3.14.). O transdutor diferencial de pressão utilizado era da marca Validyne, modelo P305D, registando a pressão máxima de 88 cm.c.a (0,125 psi) com erro máximo de $\pm 0,5\%$.



Figura 3.14. - Transdutor diferencial de pressão utilizado

Como o próprio nome indica, um transdutor diferencial de pressões, regista diferenças de pressão, sendo então necessário estabelecer uma referência para as medições realizadas. Para referência foi utilizado o nível de água numa proveta graduada colocada num suporte móvel, equipado com uma plataforma de altura regulável, permitindo fixar esse nível no valor desejado em cada caso (Figura 3.15.). A possibilidade de colocar esta proveta a níveis variáveis permitia ter o transdutor, fixo em determinada posição, trabalhando sempre dentro da sua gama de utilização.



Figura 3.15. - Conjunto suporte móvel/proveta graduada

O transdutor foi ligado a um dos canais do sistema de aquisição de dados para recolha destes e seu posterior tratamento.

3.4.3. MEDIÇÃO DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO NO FUNDO DO CANAL DE RESTITUIÇÃO

Considerou-se ser de interesse a análise das flutuações de pressão originadas pelo impacto dos jactos descarregados na zona do seu impacto.

Na impossibilidade de dispor de um transdutor de pressão que pudesse registar essas flutuações recorreu-se a sondas piezo-eléctricas que, como é sabido, apenas permitem a avaliação desses valores. As placas utilizadas foram em número de quatro e do modelo KPSG100 da Kingstate e estão representadas nas figuras 3.16 e 3.17. O funcionamento destas sondas não permite o seu contacto directo com a água pelo que foram protegidas por um filme plástico.

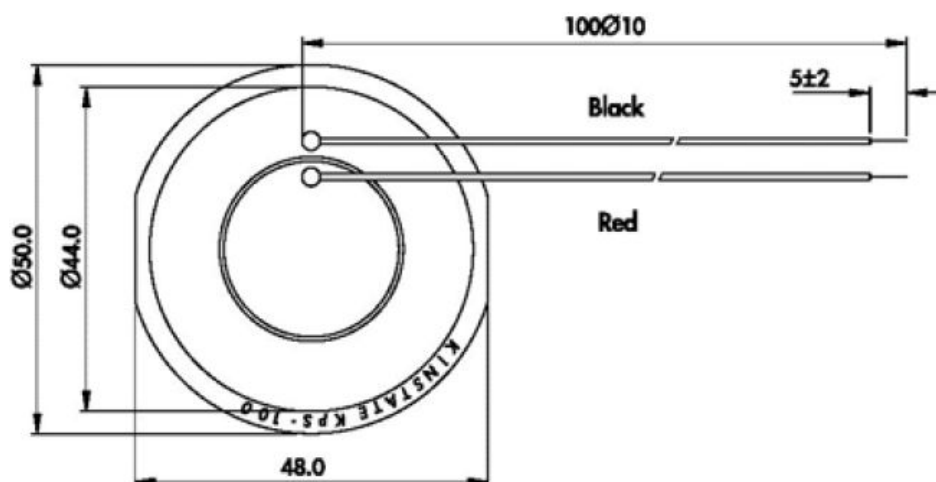


Figura 3.16. - Dimensões das sondas piezo-eléctricas

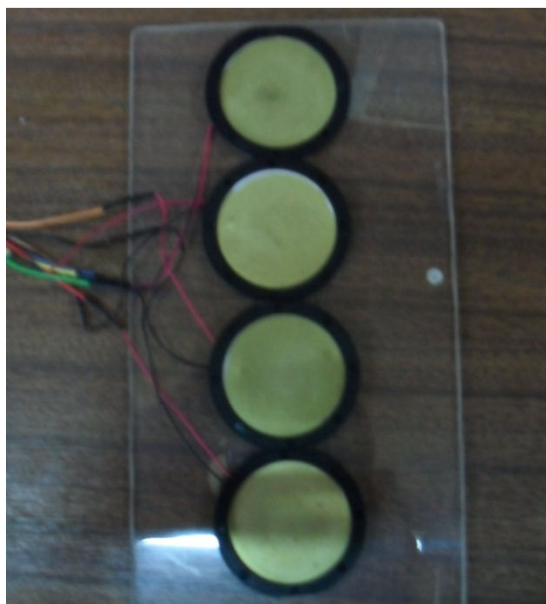


Figura 3.17. - Sondas piezo-eléctricas utilizadas para a medição de flutuações de pressão

Cada um dos sensores foi ligado ao sistema de aquisição de dados permitindo a aquisição simultânea das suas diferenças de potencial quando as sondas piezo-eléctricas são solicitadas pela acção do jacto descarregado.

3.4.4. MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA

Como já foi referido anteriormente será necessário proceder à medição das alturas de água sobre o lábio de saída do trampolim em salto de esqui para que, assim, seja possível, conhecido de antemão o caudal escoado, determinar a velocidade média de saída do trampolim que terá implicações em termos de cálculo do alcance dos jactos.

Para cumprimento deste objectivo considerou-se a possibilidade de utilização de dois métodos. O primeiro método consistia na medição de pressões estáticas localizadas o mais próximo possível do lábio do trampolim através de um piezómetro (Figura 3.18.). O segundo baseava-se na detecção das posições de um flutuador colocado no escoamento, na secção de medida (Figura 3.19.).



Figura 3.18. - Pormenor do trampolim com tomada de pressão

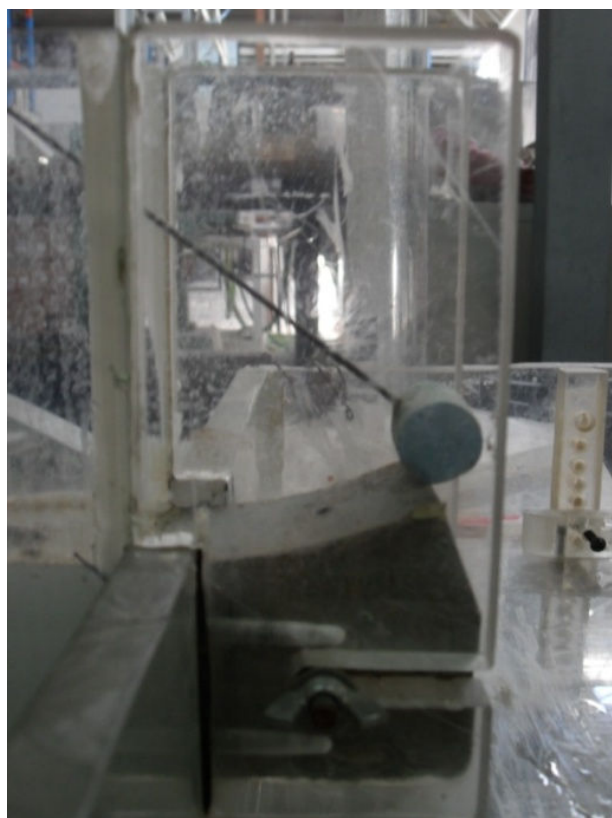


Figura 3.19. - Flutuador sobre o lábio do trampolim

O primeiro processo consistia em determinar a altura de água sobre o lábio do trampolim, através de uma tomada de pressão, com 2 mm de diâmetro, introduzida, no modelo do trampolim no momento da betonagem, a qual foi colocada perpendicularmente ao plano em que se encontra aplicada, e posteriormente ligada a um tubo piezométrico.

As alturas de água poderiam ser obtidas de forma directa por medição da altura de água no piezómetro em relação ao nível do lábio do trampolim ou, para maior comodidade e precisão, utilizando o transdutor diferencial de pressão, referido em 3.4.2., que permitiria registar os valores médios e respectivas flutuações dos mesmos. Para altura de água de referência utilizar-se-ia a mesma proveta instalada no sistema de suporte referido anteriormente.

Este processo revelou-se, no entanto, ineficaz pois, devido ao grande emulsionamento de ar na secção do trampolim havia introdução de ar nos tubos piezométricos não obtendo, desta forma, resultados correctos das alturas de água sobre o lábio do trampolim.

Para medições das alturas de água utilizou-se então o segundo método que fazia uso de um sistema de flutuador (Figura 3.21.). O sistema era constituído por um corpo capaz de flutuar na água, ligado a um potenciómetro apto a transmitir, para o sistema de aquisição de dados, um sinal eléctrico (ou tensão) relacionado com a posição do corpo a ele ligado. Este corpo foi realizado em polietileno tendo um diâmetro de 2 cm (Figura 3.19.). O flutuador foi colocado numa das extremidades de uma vareta de aço a qual passa pelo seu centro de gravidade. A extremidade oposta foi ligada ao já referido potenciómetro cuja tensão está relacionada com a posição do flutuador. As posições do flutuador corresponderão a distintas posições angulares da vareta.

É possível por simples relações matemáticas estabelecer uma relação entre a posição angular da vareta e a posição do flutuador relativamente a qualquer plano de referência. Considerando como A , o parâmetro que traduz a altura entre lábio do trampolim e o centro de rotação do eixo do potenciómetro, B , o comprimento da vareta de suporte do flutuador, $d/2$, o raio do flutuador, e , a distância da superfície do flutuador ao plano de referência e β , o ângulo entre a posição da vareta ligada ao flutuador e a vertical é possível, com base na figura 3.20., estabelecer a seguinte relação:

$$\cos \beta = \frac{A - \left(e + \frac{d}{2}\right)}{B} \quad (3.3.)$$

O ângulo β está relacionado com o sinal emitido pelo potenciómetro e poderá ser devidamente adquirido e tratado pelo sistema de aquisição de dados.

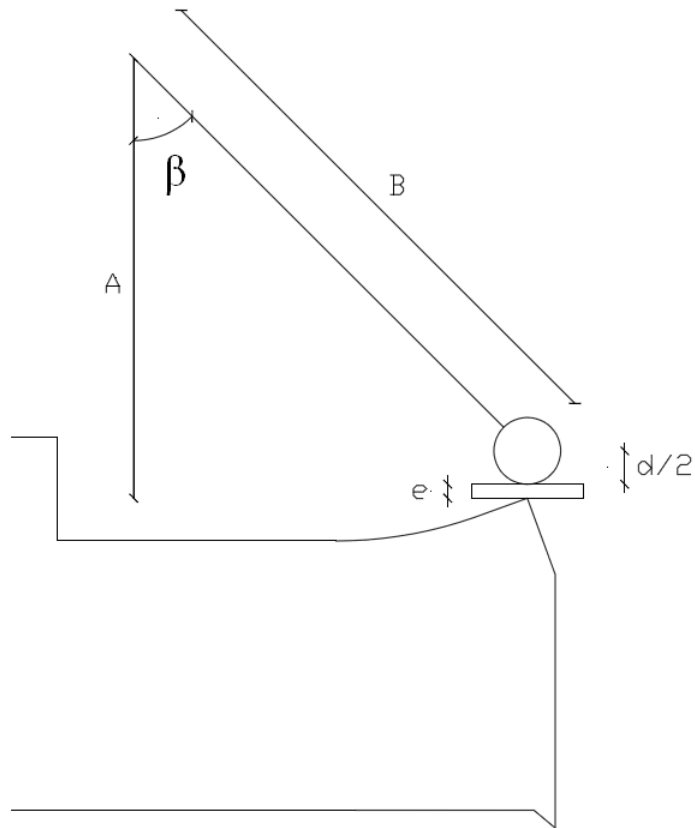


Figura 3.20. - Significado dos parâmetros envolvidos no cálculo da posição angular da vareta e correspondentes alturas de água



Figura 3.21. – Sistema Flutuador/Potenciômetro ligado aos adaptadores ajustáveis

3.4.5. REGISTO DE TRAJECTÓRIAS REAIS DE JACTOS POR TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

É necessária a comparação das trajectórias teóricas dos jactos com o seu comportamento real no modelo. Utilizando a técnica apresentada no trabalho de Aleixo e Proença [35], decidiu-se recorrer à técnica de aquisição de imagens para esse registo e posterior comparação. De facto, este método permitiu-lhe obter excelentes resultados, tendo ainda a vantagem de ser um método expedito, de simples aplicação e que envolve a utilização de poucos recursos.

O método consiste basicamente na captura de imagens, neste caso por meio de uma máquina fotográfica digital Samsung PL50 com 10.2 Megapixéis, utilizando apenas 5 Megapixéis para a captura das fotos, e posterior tratamento das imagens capturadas para obtenção dos dados pretendidos. Para o tratamento e processamento das imagens recorreu-se a um programa freeware, o GIMP disponível na Internet, cujas funções se revelam suficientes para o caso em estudo.

Como o objectivo da aplicação desta técnica, neste estudo, é a obtenção dos alcances dos jactos será necessário estabelecer uma relação entre as unidades de pixéis, que constituem a fotografia, e a realidade sendo assim possível calcular com a maior precisão possível o alcance real dos jactos. A relação entre pixéis (coordenadas da imagem) e a realidade (coordenadas físicas) é obtida através de uma imagem de calibração que contenha uma escala de comprimentos físicos, por exemplo uma régua ou algum objecto em que sejam conhecidas as dimensões, no mesmo plano da dimensão que se quer determinar, de forma a não introduzir qualquer erro, a qual possibilitará estabelecer a correspondência entre os dois sistemas de coordenadas.

Obtida a referência física poderão ser definidos os seguintes factores de calibração:

$$\alpha_x = \frac{x_0}{i_0} \quad (3.4.)$$

$$\alpha_y = \frac{y_0}{j_0} \quad (3.5.)$$

Em que, x_0 e y_0 representam as dimensões físicas, horizontal e vertical (conhecidas) de um objecto e i_0 e j_0 as suas dimensões (horizontais e verticais) em pixéis.

Para a aquisição deverá ter-se em conta a iluminação em redor já que uma boa iluminação irá conduzir a imagens mais esclarecedoras e poderá evitar algumas etapas no pós-processamento, como por exemplo o aumento de contraste. Outro factor a considerar será a garantia de alinhamento do sistema de aquisição de imagens pelo que deverá utilizar-se um tripé que permita fixar a máquina e mantê-la na mesma posição.

Com este processo, com provas dadas no estudo de jactos provenientes de orifícios, pretende-se obter resultados bastante positivos que permitam fazer uma análise comparativa crítica do alcance teórico e efectivo dos jactos relativamente ao que realmente se verifica no modelo em estudo.

3.4.6. DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DA FOSSA DE EROSÃO

Nos estudos realizados com fundos móveis (Figura 3.22.) cuja finalidade era a análise das fossas de erosão causadas pelos jactos da descarga de diferentes caudais com diferentes condições de escoamento verificou-se ser necessária a definição da dimensão dessas fossas utilizando um processo rápido e expedito.



Figura 3.22. - Vista do leito do rio realizado em material não coerente

Para o efeito foi construído um dispositivo constituído por uma régua de perspex perfurada dando suporte a várias varetas cuja posição era facilmente ajustável (Figura 3.23.).



Figura 3.23. - Exemplo de medição das fossas de erosão

Antes do início do ensaio, o dispositivo foi colocado no canal de restituição, em posição previamente definida, para que seja possível registar o valor do parâmetro T, presente na figura 3.24., sendo recolocado na mesma posição após o fim dos ensaios para, ajustando as varetas à configuração da fossa de erosão existente, permitir a definição da forma dessa fossa.

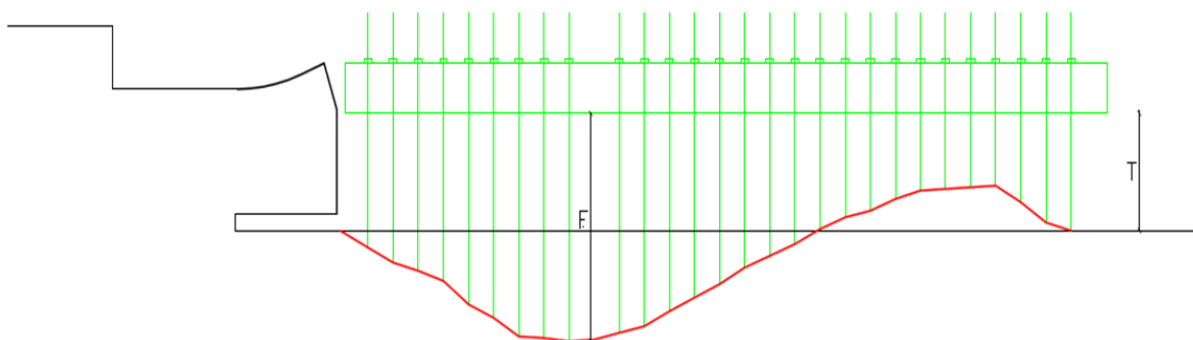


Figura 3.24. - Esquema das variáveis envolvidas no cálculo das profundidades de erosão

O valor F é obtido pela medição, com recurso a fita métrica, da distância entre o final da vareta até à face inferior da estrutura de suporte das varetas e T, que representa a distância entre a mesma face inferior de suporte das varetas e o terreno inicial, será constante para todos os ensaios e igual a 7 cm. Assim, medindo todos pontos que se deseje será fácil transformar os valores F em profundidades de erosão, f, através de:

$$f = F - T \quad (3.6.)$$

No entanto, no decorrer dos ensaios com caudais mais elevados, observou-se que passaria a existir uma realimentação da fossa de erosão com material que já tinha sido erodido. Tal acontece devido às reduzidas dimensões do reservatório que proporcionam a criação de correntes de recirculação que irão transportar o material erodido novamente para montante (Figura 3.25.). Assim, por observação dos vários caudais a estudar, concluiu-se que de forma a obter fossas de erosão com comportamento de evolução correcto (Figura 3.26.) apenas seria possível estudar três caudais, 0,51 l/s, 0,71 l/s e 0,85 l/s.

Deve ser referido também que, o correcto nivelamento do leito do rio é de extrema importância de forma a evitar que a evolução da fossa de erosão ocorra de forma assimétrica. Também importante será a movimentação do material do leito entre ensaios para evitar a compactação do mesmo com a finalidade de realizar todos os ensaios da forma mais similar possível.



Figura 3.25. – Fossa de erosão com realimentação



Figura 3.26. - Fossa de erosão com evolução correcta

3.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados utilizado é constituído por duas placas de aquisição de dados, ambas da National Instruments. A primeira é uma NI USB-6009 que foi utilizada para receber o sinal do dispositivo medidor de caudais, do flutuador/potenciómetro e do transdutor diferencial e a segunda, uma NI USB-6008, foi usada para a captação do sinal das sondas piezoelétricas. Como se possuem duas placas de aquisição de dados estão, então, disponíveis, no total, doze canais para captura do sinal emitido por cada equipamento. Assim, será possível registar simultaneamente as diferenças de potencial emitidas pelo dispositivo de medição de caudais, pelo potenciómetro, pelo transdutor diferencial de pressão e pelas quatro sondas piezo-elétricas. As placas de aquisição de dados estão conectadas a um computador Intel ® Pentium ® CPU 3.00 GHz existente no Laboratório de Hidráulica. Nesse computador está instalado o software LabView 8.6 que permite a emissão de ordens de captura de sinal e exportação de ficheiros Excel com toda a informação necessária para este estudo permitindo, o seu tratamento. Determinar-se-ão o valor médio ($\bar{x}$) da amostra de N valores e os valores caracterizadores das flutuações de uma dada amostra que serão dados através do valor que se designará por R.M.S. (“root mean square”) calculados conforme as seguintes expressões:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.7.)$$

$$R.M.S. = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (3.8.)$$



Figura 3.27. - Placas de aquisição de dados utilizadas neste estudo

3.6. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

A necessidade de verificação do bom funcionamento dos equipamentos ou a sua adaptação aos estudos a realizar obrigaram à calibração dos diferentes equipamentos de medida.

3.6.1. MEDIDOR DE CAUDAIS

A calibração do equipamento medidor de caudais foi realizada utilizando um reservatório calibrador presente na figura 3.28. Este reservatório permite a avaliação, com precisão, dos volumes nele contidos através de indicadores de nível e da leitura directa de uma régua graduada que lhe está acoplada. O escoamento atravessando o equipamento de medição de caudais do tipo electromagnético irá ser descarregado directamente no reservatório calibrador avaliando simultaneamente o tempo de cada descarga.



Figura 3.28. - Reservatório calibrador

O procedimento seguido no processo de calibração foi o seguinte:

- a) Accionamento da bomba que alimenta o circuito hidráulico que agora funcionará em circuito aberto com descarga para o reservatório calibrador;
- b) Regulação da válvula do circuito hidráulico de modo a que o caudal se aproxime do valor desejado, neste caso 0,2 l/s (através do visor do dispositivo de medição de caudais);
- c) Proceder à alimentação, constante e regulada, a partir rede de reservatórios de alimentação do circuito hidráulico por bombagem, para que o nível de água permaneça sensivelmente

- constante, ou seja, garantir que exista o fornecimento de um caudal igual ao bombado (procedimento para que o ponto de funcionamento da bomba não se altere significativamente durante o funcionamento mantendo assim constante o caudal ao longo do tempo);
- Enchimento do reservatório calibrador até um volume inicial, neste caso 20 litros;
 - Determinação do caudal através da contabilização do tempo necessário para o enchimento do reservatório entre os 20 e 40 litros;
 - Repetição do passo e) por 4 vezes.
 - Registo do sinal do equipamento de medição de caudais no computador. Foram requisitados 1000 valores ao longo de 10 segundos;
 - Anotar cerca de 12 valores lidos directamente do visor do dispositivo de medição de caudais para controlo dos valores obtidos pelos passos e) e f);
 - Repetição dos passos b) a h) para os caudais 0,4 l/s, 0,5 l/s, 0,6 l/s e 0,8 l/s.
 - Tratamento dos dados obtidos.

No tratamento dos dados registados serão comparados os valores lidos no visor do dispositivo medidor de caudais com os valores de caudal obtidos através do reservatório calibrador e se tal comparação for satisfatória proceder-se-á à construção da recta de calibração do dispositivo em questão tendo em abcissas o valor médio de diferença de potencial registado pelo sistema de aquisição de dados e em ordenadas o valor correspondente médio de caudal.

Quadro 3.2. - Características das escalas de medição utilizadas

Equipamento	Menor divisão da escala	Erro de leitura
Tanque	1 l	$\pm 0,5$ l
Cronómetro	0,01 s	$\pm 0,005$ s
Visor do equipamento medidor de caudais	0,0001 l/s	-

Quadro 3.3. - Registos dos intervalos de tempo necessários para o enchimento de 20 litros no reservatório calibrador

Volume (Litros)	Tempo (segundos)				
	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5
20-40	99,1	49,05	39,59	33,15	24,74
40-60	97,9	49,30	39,47	33,64	25,40
60-80	99,03	49,15	41,02	34,02	24,71
80-100	97,85	49,09	40,85	33,78	24,26
100-120	97,97	49,22	40,48	33,61	24,36

Quadro 3.4. - Caudais relativos aos intervalos de tempo indicados no Quadro 3.4.

Leitura	Caudal 1 (l/s)	Caudal 2 (l/s)	Caudal 3 (l/s)	Caudal 4 (l/s)	Caudal 5 (l/s)
1	0,201816	0,407747	0,505178	0,603318	0,808407
2	0,204290	0,405680	0,506714	0,594530	0,787402
3	0,201959	0,406918	0,487567	0,587889	0,809389
4	0,204394	0,407415	0,489596	0,562066	0,824402
5	0,204144	0,406339	0,494071	0,595061	0,821018
Valor Médio (l/s)	0,203321	0,406820	0,496625	0,594573	0,810124
R.M.S. (l/s)	0,001312	0,000830	0,008845	0,005650	0,014512

Quadro 3.5. - Registo dos caudais lidos no visor do equipamento de medição de caudais

Leitura	Caudal 1 (l/s)	Caudal 2 (l/s)	Caudal 3 (l/s)	Caudal 4 (l/s)	Caudal 5 (l/s)
1	0,2000	0,4000	0,4971	0,6168	0,7739
2	0,2067	0,4050	0,5010	0,6049	0,7845
3	0,2100	0,3980	0,4941	0,6047	0,7961
4	0,2080	0,4040	0,4932	0,6349	0,7746
5	0,2100	0,4050	0,4951	0,6012	0,8082
6	0,2000	0,4130	0,5021	0,6079	0,7854
7	0,2030	0,4000	0,4972	0,5967	0,7864
8	0,2010	0,4120	0,4982	0,6032	0,7962
9	0,2080	0,3960	0,4921	0,5944	0,8117
10	0,2060	0,4100	0,4961	0,6115	0,8136
11	0,2090	0,4020	0,4850	0,6002	0,7936
12	0,2080	0,4040	0,4972	0,6282	0,7952
Valor Médio (l/s)	0,2058	0,4041	0,4957	0,6087	0,7933
R.M.S. (l/s)	0,0038025	0,0053845	0,0044573	0,0123526	0,0131637

Quadro 3.6. - Análise estatística dos valores registados no computador

	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 4	Caudal 5
Valor Médio (volt)	0,321849	0,603017	0,734146	0,889304	1,174148
R.M.S. (volt)	0,003769	0,004456	0,011620	0,005477	0,007172

Pela comparação dos valores médios dos quadros 3.4. e 3.5. (valores medidos experimentalmente e valores indicados no visor do equipamento de medição de caudais, respectivamente) conclui-se que os caudais anotados no ecrã do aparelho coincidem de forma suficiente com os caudais obtidos por testes no reservatório calibrador pelo que se considerou que o dispositivo de medição de caudais tem um funcionamento correcto procedendo então à determinação da recta de calibração presente na figura 3.29.

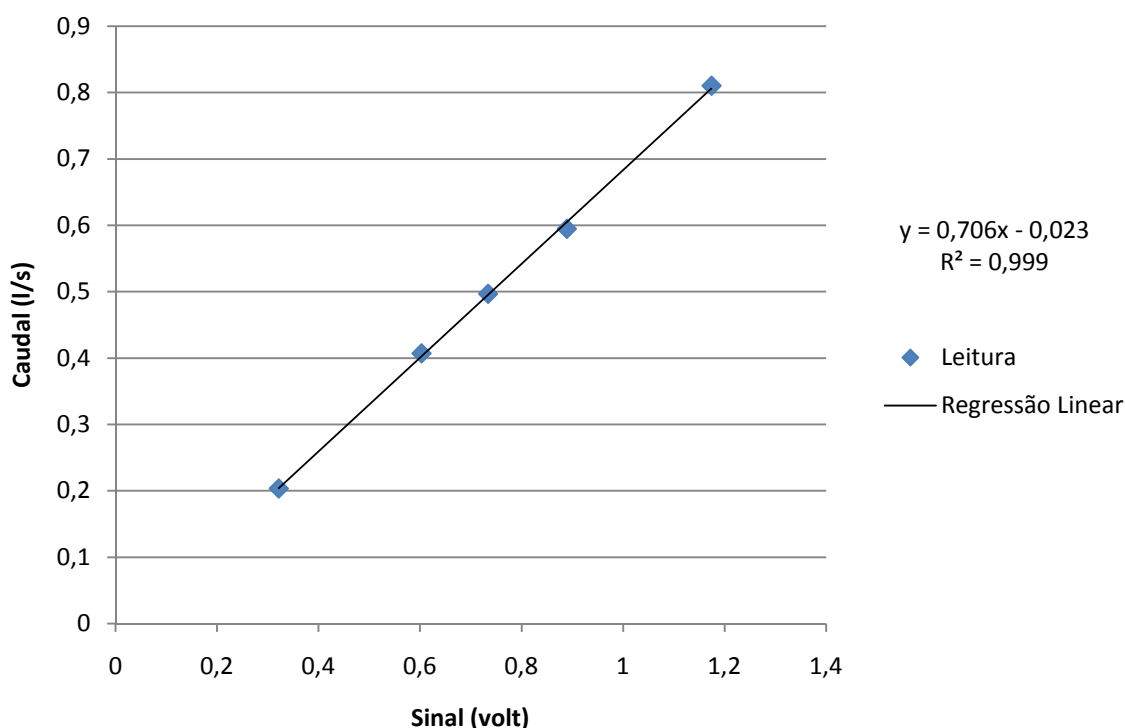


Figura 3.29. - Lei de calibração do equipamento de medição de caudais

Como crítica a esta curva deve ser dito que, embora se tenha obtido uma recta de boa qualidade, comprovada pelo elevado coeficiente de correlação, no processo de calibração deveriam ter sido testados caudais maiores do que aqueles que foram indicados para que a recta tivesse uma maior representatividade da realidade. Tal não foi possível devido a limitações intrínsecas ao sistema utilizado, principalmente pelo insuficiente caudal de abastecimento do reservatório de alimentação do dispositivo medidor de caudais. Se o caudal fosse maior que o máximo experimentado, o abastecimento de água a montante não seria suficiente, pelo que o nível de água nesse reservatório iria diminuindo ao longo do tempo e o ponto de funcionamento da bomba iria ser alterado, não se mantendo também constante o caudal, o que não seria de todo desejável para esta calibração.

3.6.2. TRANSDUTOR DIFERENCIAL DE PRESSÃO

O transdutor diferencial de pressão foi calibrado periodicamente durante as medições realizadas utilizando, para tais calibrações, um sistema constituído por dois reservatórios cilíndricos (Figura 3.30.) onde é possível ter vários níveis de água. Cada uma das duas tomadas de pressão do transdutor foi ligada ao fundo de cada um dos reservatórios que estavam munidos de limnómetro e que permitem avaliar os níveis de água neles contidos e as diferenças entre esses níveis. O processo de calibração consiste nos seguintes passos:

- a) Conectar todo o circuito (reservatórios cilíndricos – transdutor diferencial de pressão – computador);
- b) Purgar qualquer bolha de ar que possa haver no circuito, garantindo assim a não existência de medidas erróneas no processo de calibração;
- c) Igualar os níveis de água dentro de cada um dos reservatórios através da abertura de válvula de comunicação dos dois reservatórios. Fecho da válvula quando se verificar o mesmo nível de água em ambos recipientes;
- d) Registo dos valores de pressão verificada (diferença de potencial) no computador. Foram medidos 1000 valores num intervalo de tempo de 10 segundos;
- e) Leitura do nível em um dos reservatórios através de limnómetro com escala munida de nónio, onde a menor divisão da escala é de 0,01 cm o que introduzirá um erro de leitura de $\pm 0,005$ cm;
- f) Retirada de água do reservatório onde se procedeu à leitura do nível de água mantendo o nível do outro reservatório, criando assim uma diferença de pressão;
- g) Repetição dos passos d) e e) para o novo nível de água quando este tiver estável;
- h) Repetição dos passos f) e g) para um total de seis medições onde é retirada água do reservatório;
- i) Concluídas as medições no processo de esvaziamento irão ser realizadas novas seis medições, de forma análoga à referida anteriormente mas em processo de enchimento do reservatório recorrendo à bomba que serve a instalação;
- j) Tratamento dos dados de comparação dos níveis registados no reservatório e da diferença de potencial registada pelo transdutor de pressão.



Figura 3.30. – Instalação utilizada para calibração do transdutor diferencial de pressão (à esquerda) e pormenor do aparelho utilizado para leitura dos níveis de água (à direita)

O tratamento dos dados adquiridos permitirá a determinação da média e do desvio padrão da diferença de potencial de cada conjunto de registos adquiridos para cada diferença de nível de água nos reservatórios. Foi então possível obter por regressão linear a lei de variação dos valores das diferenças de pressão em função dos valores da diferença de potencial, lei essa que traduz a lei de calibração do transdutor que a seguir se apresenta.

Quadro 3.7. - Registo dos níveis de água e análise estatística dos registos efectuados pelo transdutor diferencial de pressão

Leitura	Valor Lido (cm)	Diferença de nível (cm)	Valor médio (volt)	R.M.S. (volt)
1	37,99	0,00	0,261192	0,001117
2	35,44	2,55	0,404702	0,001073
3	31,83	6,16	0,607634	0,001107
4	25,27	12,72	0,977679	0,001209
5	11,09	26,90	1,777671	0,001211
6	1,09	36,90	2,345400	0,006274
7	4,98	33,01	2,126105	0,009904
8	11,71	26,28	1,745335	0,001151
9	14,64	23,35	1,579609	0,001206
10	24,00	13,99	1,050733	0,004402
11	30,60	7,39	0,682992	0,012542
12	36,35	1,64	0,356578	0,001147

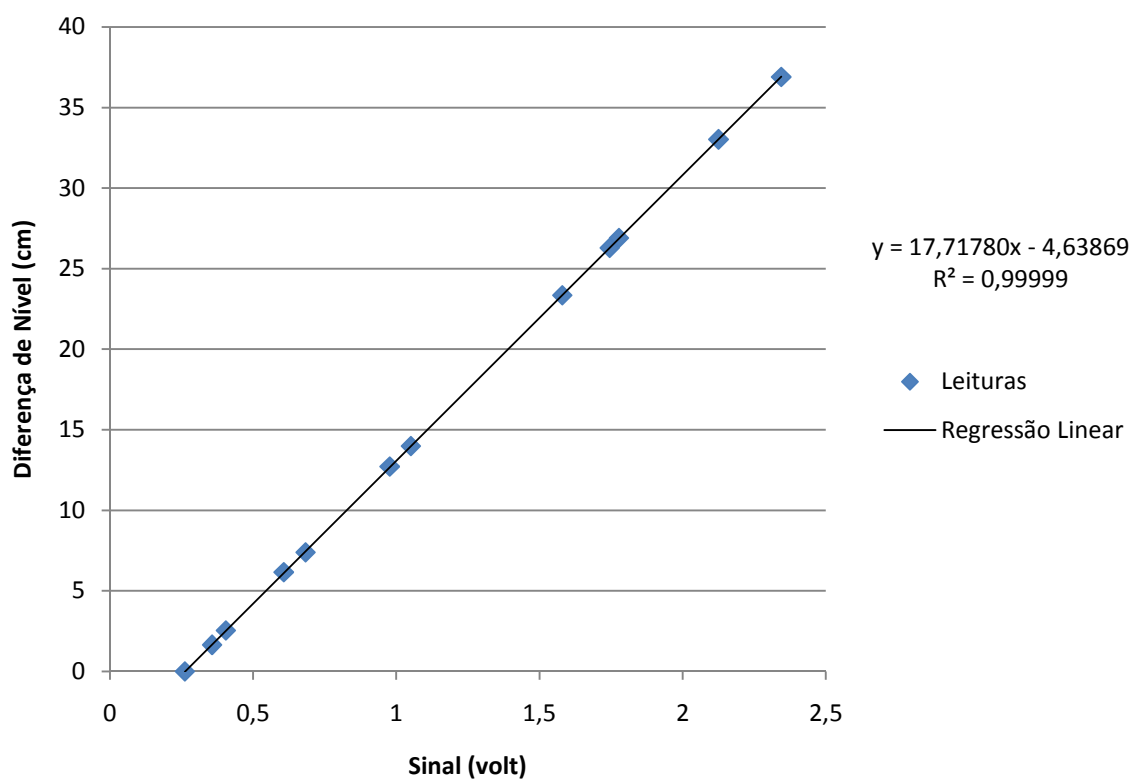


Figura 3.31. - Lei de calibração do Transdutor Diferencial de Pressão

Em virtude da calibração ser uma calibração estática do transdutor, os valores de R.M.S. traduzem flutuações do sinal adquirido resultantes do próprio sistema de aquisição e do próprio transdutor e não variações dos valores a medir. O facto de se terem efectuado 1000 registos permitiu que o valor médio registado tomasse um valor coerente como se comprova pela qualidade da recta de regressão obtida. De resto, esta lei de calibração está dentro dos limites aceitáveis em experimentação.

3.6.3. SONDAS PIEZO-ELÉCTRICAS

A calibração das sondas piezo-eléctricas foi realizada recorrendo a um martelo dinâmico do modelo 5801B da Dynapulse. Ligando esse martelo dinâmico ao sistema de aquisição de dados é possível registar a diferença de potencial correspondente ao choque provocado pelo operador sobre uma dada superfície e, conhecendo a constante de sensibilidade do martelo fornecida pelo fabricante (2,26 mV/N), será fácil transformar o valor médio da diferença de potencial numa força resultante média. Esta força resultante média, por altura da calibração, será distribuída por uma placa de perspex de diâmetro conhecido, 1,97 cm, resultando assim numa pressão média actuante na área da referida placa de perspex que será transmitida para a sonda piezo-eléctrica que irá registar uma diferença de potencial correspondente à pressão actuante. Os equipamentos de calibração são apresentados na figura 3.32.



Figura 3.32. - Equipamentos utilizados na calibração das sondas piezo-eléctricas

Para obter uma total correspondência entre a actuação do martelo dinâmico e o registo efectuado pelas sondas piezo-eléctricas (Figura 3.33.) é necessário que ambos os equipamentos estejam conectados em simultâneo ao sistema de aquisição de dados que irá adquirir 2500 valores por segundo para uma amostra total de 10000 valores.

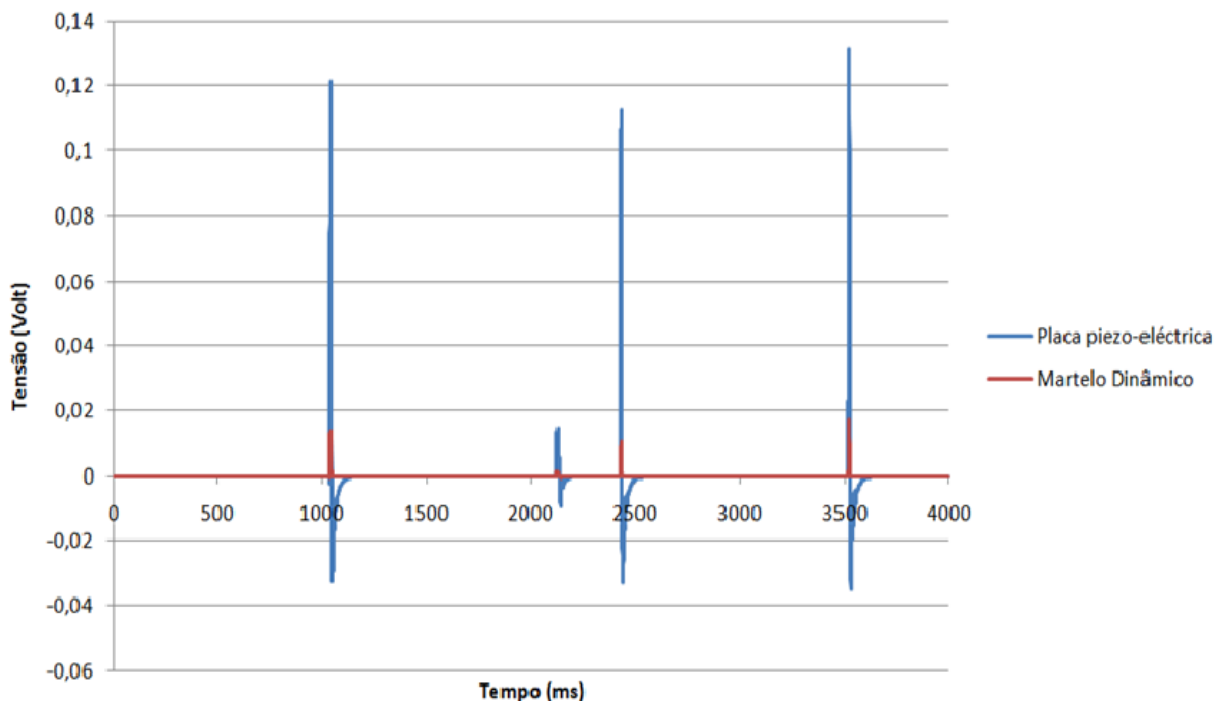


Figura 3.33. - Comparação da tensão originada pelo martelo dinâmico quando actuando sobre a sonda piezo-eléctrica com a tensão transmitida, ao sistema de aquisição de dados, pela sonda piezo-eléctrica quando sujeita à acção do martelo dinâmico

Verifica-se pela análise do gráfico apresentado anteriormente que a correspondência entre os valores capturados pelo martelo dinâmico e pelas sondas piezo-eléctricas é perfeita pelo que será fiável estabelecer uma recta de conversão do valor de diferença de potencial média capturada pelas sondas em pressões médias actuantes. Pelos testes realizados para a calibração deste equipamento concluiu-se que a pressão média actuante de 2585,588 N/m², ou seja 26,357 cm.c.a., corresponderia a uma diferença de potencial de um volt. Assim apresenta-se de seguida a recta de calibração das sondas piezo-eléctricas.

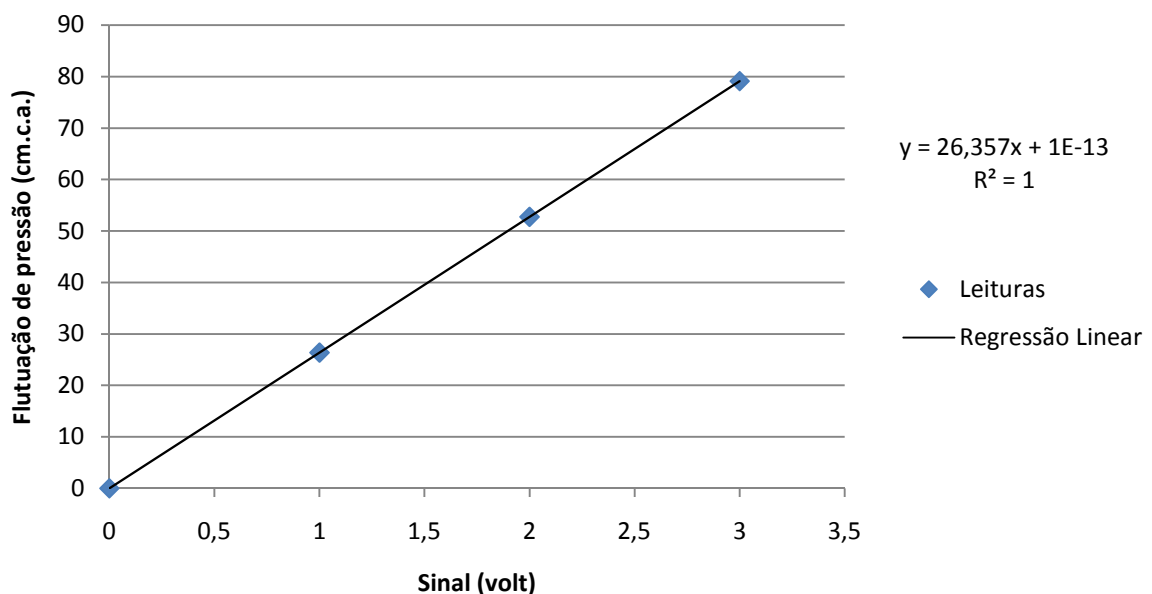


Figura 3.34. - Lei de calibração das sondas piezo-eléctricas

3.6.4. FLUTUADOR/POTENCIÓMETRO

Uma calibração correcta deste sistema permitirá determinar de maneira rápida e simples as alturas de água sobre o lábio do trampolim utilizado neste trabalho. A calibração do sistema será realizada a seco e será executada com o auxílio de várias placas de perspex de espessura conhecida que serão colocadas sobre o lábio do salto de esqui de forma a estarem fixas e niveladas e que simulam neste caso diferentes níveis de água. Para proceder à calibração do aparelho de medição ajustaram-se os adaptadores às paredes do descarregador para que o flutuador esteja posicionado com o seu extremo inferior sobre o lábio do trampolim. De facto, a calibração implica a escolha de um plano fixo para o ajuste dos adaptadores de maneira a garantir a constância das condições de calibração/medição, nomeadamente das dimensões A, B e $d/2$ cujo significado físico se representa na figura 3.20. O sistema de medição utilizado encontra-se na figura 3.21.

A necessidade de realizar medições de alturas de água sobre o lábio do trampolim em salto de esqui introduz uma problemática. De facto, o sistema de medição considerado traduz uma posição angular, assim, será fácil compreender que à medida que o parâmetro e aumenta também aumentará o ângulo β o que fará com que o flutuador se distancie cada vez mais do lábio do trampolim. Assim, embora esta constatação não influencie o processo de calibração o mesmo já não acontece quando se pretende fazer uma medição de uma altura de água com um determinado caudal, já que com o aumentar do caudal o flutuador terá tendência a distanciar-se do lábio do trampolim conduzindo então a uma altura de água que não corresponderá à da secção que se pretende medir. Para reduzir a influência de tal facto realizaram-se quatro calibrações que correspondem a quatro gamas de caudais onde se fez recuar o adaptador da estrutura acoplada ao potenciómetro à medida que se aumentavam os caudais considerados em cada gama (Figura 3.35.). A alteração da posição do conjunto flutuador/potenciómetro traduz-se apenas na variação do parâmetro A.



Figura 3.35. - Posição correcta de medição da altura de água

O processo de calibração, para cada gama de caudais, consiste, então, nos seguintes passos:

- Ajuste dos adaptadores do potenciómetro à posição desejada;
- Medição do parâmetro A com fita métrica;
- Medição do parâmetro B com fita métrica (B=24,5 cm, constante para todas as gamas de caudais);
- Aplicação da placa de perspex, de espessura conhecida, correctamente fixa e nivelada, sobre o lábio do trampolim;
- Leitura do sinal obtido pelo potenciómetro, sendo retirados 500 valores ao longo de 5 segundos;
- Repetição dos passos d) e e) para novas placas de perspex.

Como já foi referido, o sinal obtido pelo potenciómetro está relacionado com a posição angular da vareta ligada ao flutuador, no entanto esse relacionamento não é directo pelo que será necessário calcular o ângulo correspondente a cada placa de perspex utilizada em cada gama de caudais pela expressão (3.3.).

Obtidos os ângulos β será fácil obter uma recta de calibração que em abcissas terá o valor médio da diferença de potencial registada para cada placa de perspex e em ordenadas o correspondente ângulo entre a vertical e a vareta conectada ao flutuador. Deste modo, estando na posse das rectas de calibração será bastante simples, nos ensaios futuros, proceder ao cálculo das alturas de água sobre o lábio do trampolim através de:

$$e = A - B \cdot \cos \beta - \frac{d}{2} \quad (3.9.)$$

cujos parâmetros estão indicados na figura 3.20..

Executadas as calibrações do sistema, e visto que estas foram realizadas sem água, a sua aplicação nas medições de altura de água no escoamento, durante os testes, obrigou a que se tivesse em conta o comportamento do flutuador quando introduzido no escoamento, ou seja, o grau de submersão do corpo flutuador. Testes realizados num pequeno reservatório com água indicaram que essa altura submersa, e_s seria de 6,5 mm pelo que deveria ser adicionada directamente ao parâmetro e calculado pela expressão (3.9.).

Quadro 3.8. - Processo de calibração para a gama de caudais de 0,5 a 0,9 l/s (A=15,2 cm)

e (cm)	β (graus)	Valor Médio (volt)	R.M.S. (volt)
0,55	56,142	1,284039	0,002766
1,15	57,815	1,394245	0,002617
1,75	59,458	1,495895	0,002732
1,95	60,000	1,529679	0,002735
2,1	60,404	1,560233	0,003646

Quadro 3.9. - Processo de calibração para a gama de caudais de 0,9 a 1,3 l/s (A=15,4 cm)

e (cm)	β (graus)	Valor Médio (volt)	R.M.S. (volt)
0,55	55,576	1,245781	0,002552
1,15	57,261	1,352761	0,002519
1,75	58,914	1,457446	0,002645
1,95	59,458	1,489337	0,002652
2,1	59,865	1,511461	0,002671
2,35	60,539	1,553728	0,002614

Quadro 3.10. - Processo de calibração para a gama de caudais de 1,3 a 1,7 l/s (A=15,7 cm)

e (cm)	β (graus)	Valor Médio (volt)	R.M.S. (volt)
0,55	55,576	1,245781	0,002552
1,15	57,261	1,352761	0,002519
1,75	58,914	1,457446	0,002645
1,95	59,458	1,489337	0,002652
2,1	59,865	1,511461	0,002671
2,35	60,539	1,553728	0,002614

Quadro 3.11. - Processo de calibração para a gama de caudais de 1,7 a 2,5 l/s (A=16 cm)

e (cm)	β (graus)	Valor Médio (volt)	R.M.S. (volt)
0,55	54,722	1,203320	0,002338
1,15	56,423	1,308630	0,002526
1,75	58,091	1,412362	0,002603
1,95	58,640	1,449535	0,002609
2,1	59,050	1,476813	0,002497
2,35	59,730	1,519838	0,002739
2,55	60,270	1,554826	0,002789

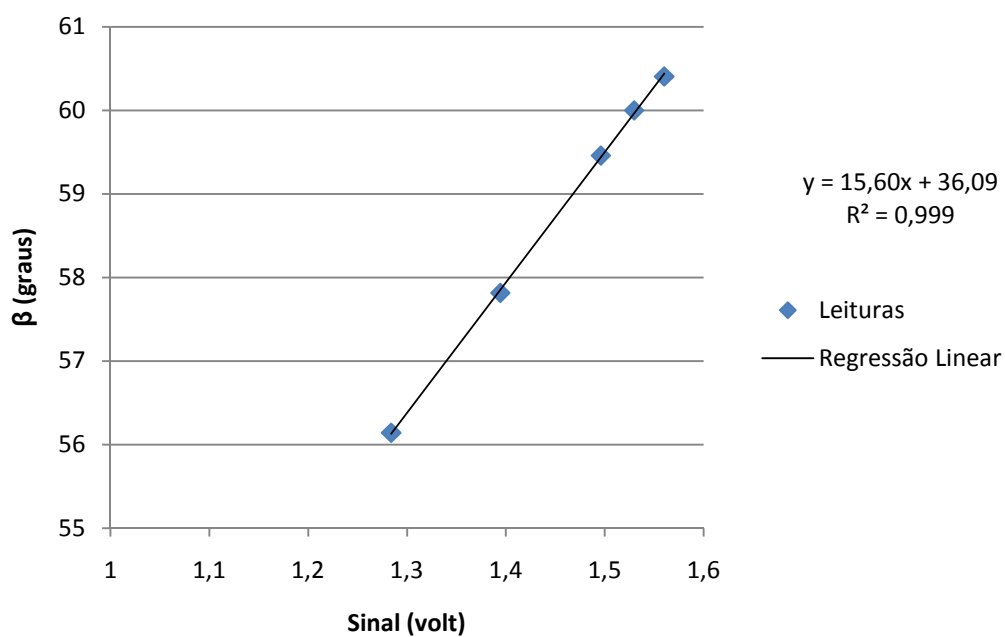


Figura 3.36. - Lei de calibração da primeira gama de caudais entre 0,5 l/s e 0,9 l/s

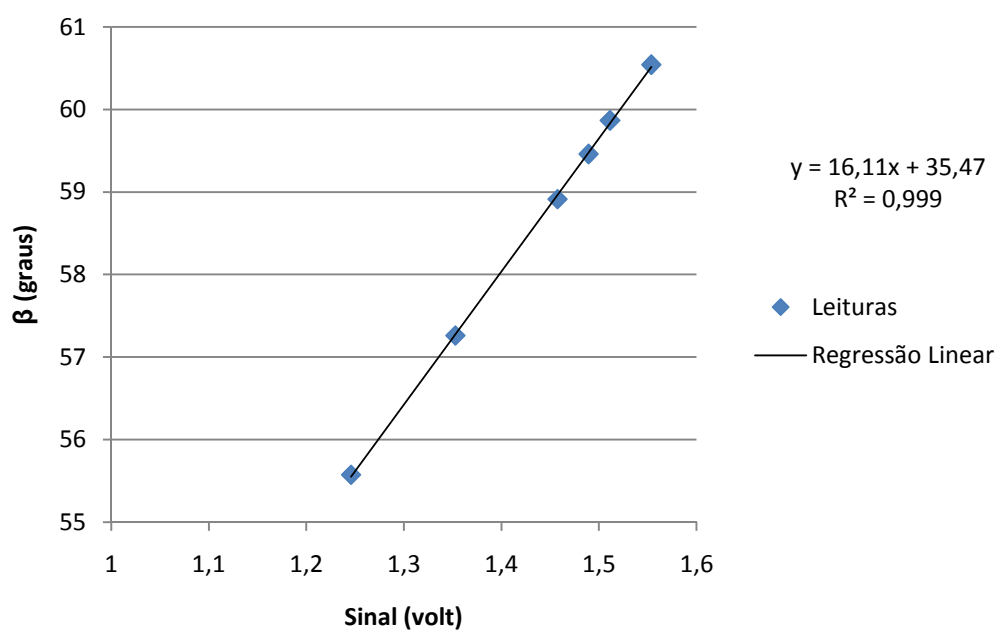


Figura 3.37. - Lei de calibração da segunda gama de caudais entre 0,9 l/s e 1,3 l/s

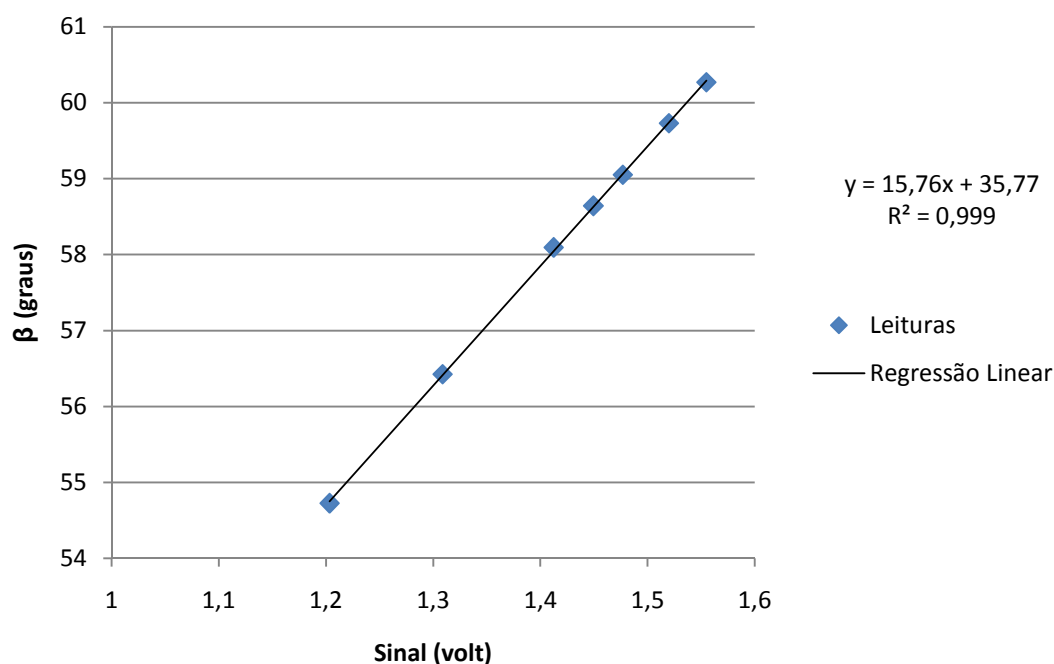


Figura 3.38. - Lei de calibração da terceira gama de caudais entre 1,3 l/s e 1,7 l/s

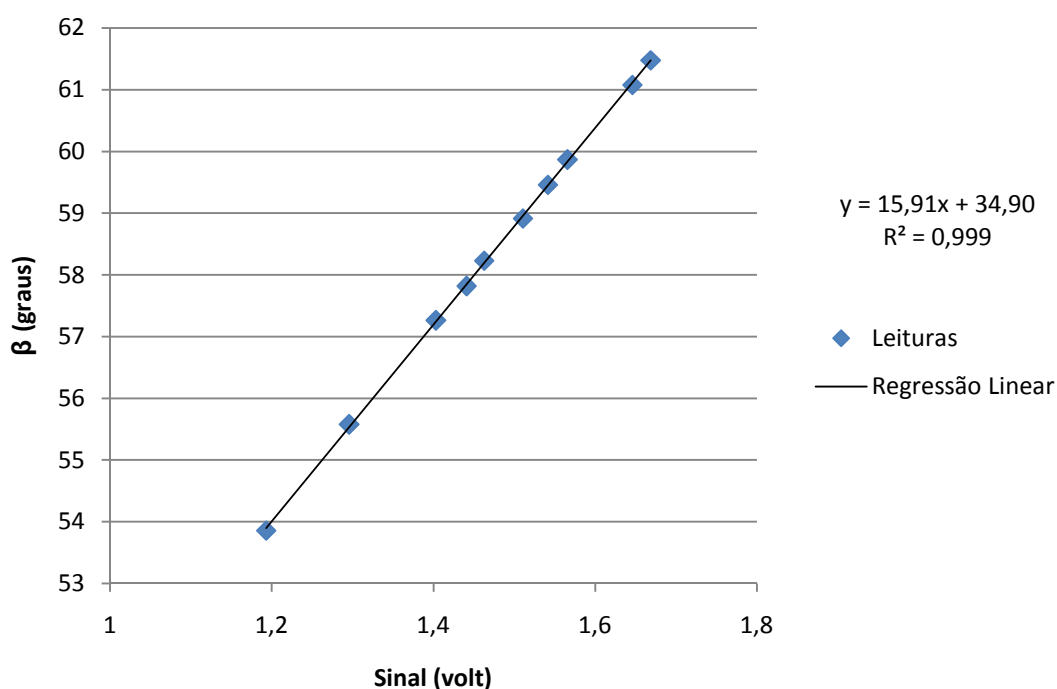


Figura 3.39. - Lei de calibração da quarta gama de caudais entre 1,7 l/s e 2,5 l/s

Como se pode ver pelos quadros e gráficos apresentados, à medida que os caudais considerados em cada gama aumentam também aumentam os pontos utilizados para construção da recta de calibração correspondente. Tal acontece devido ao aumento de alturas de água sobre o lábio do trampolim com o aumento dos caudais. Para garantir que nos extremos de cada gama de caudais as velocidades resultantes de cada recta de calibração seriam coincidentes foram realizados alguns testes que se apresentam no quadro seguinte.

Quadro 3.12. - Testes de determinação de velocidades pelo flutuador

Gama Q's (l/s)	Sinal Q (Volt)	Q (l/s)	Sinal β (Volt)	β (graus)	$y_{\text{água}}$ (cm)	U_0 (m/s)
0,5 - 0,9	0,857627	0,59	1,261041	55,77	1,07	1,10
	1,090166	0,75	1,306028	56,47	1,32	1,14
	1,325126	0,91	1,334294	56,91	1,48	1,23
0,9 - 1,3	1,324245	0,91	1,296294	56,37	1,48	1,23
	1,636334	1,12	1,342534	57,11	1,75	1,28
	1,923898	1,32	1,375617	57,64	1,94	1,36
1,3 - 1,7	1,923288	1,32	1,335972	56,84	1,95	1,35
	2,220595	1,52	1,360976	57,23	2,09	1,45
	2,507729	1,72	1,393379	57,75	2,27	1,51
1,7 - 2,5	2,519117	1,72	1,387536	56,99	2,30	1,50
	3,021785	2,07	1,441467	57,85	2,61	1,58
	3,450110	2,36	1,488644	58,60	2,89	1,63

De facto, verifica-se que para os caudais-fronteira, 0,9 l/s, 1,3 l/s e 1,7 l/s as diferenças de velocidades obtidas pelas diferentes rectas de calibração não são significativas podendo afirmar-se que as rectas de calibração obtidas são de boa qualidade.

3.6.5. IMAGEM DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Como se referiu em 3.4.5. para a correcta aplicação da técnica de aquisição de imagens terá que se recorrer a uma imagem de calibração que contenha uma escala de comprimentos físicos que pode ser traduzida na presença de uma régua ou de algum objecto em que sejam conhecidas as suas dimensões, no mesmo plano das dimensões que se pretendem conhecer.

Esta imagem de calibração (Figura 3.41.) fornecerá uma constante de conversão de coordenadas de imagem (pixéis) para coordenadas físicas (centímetros).

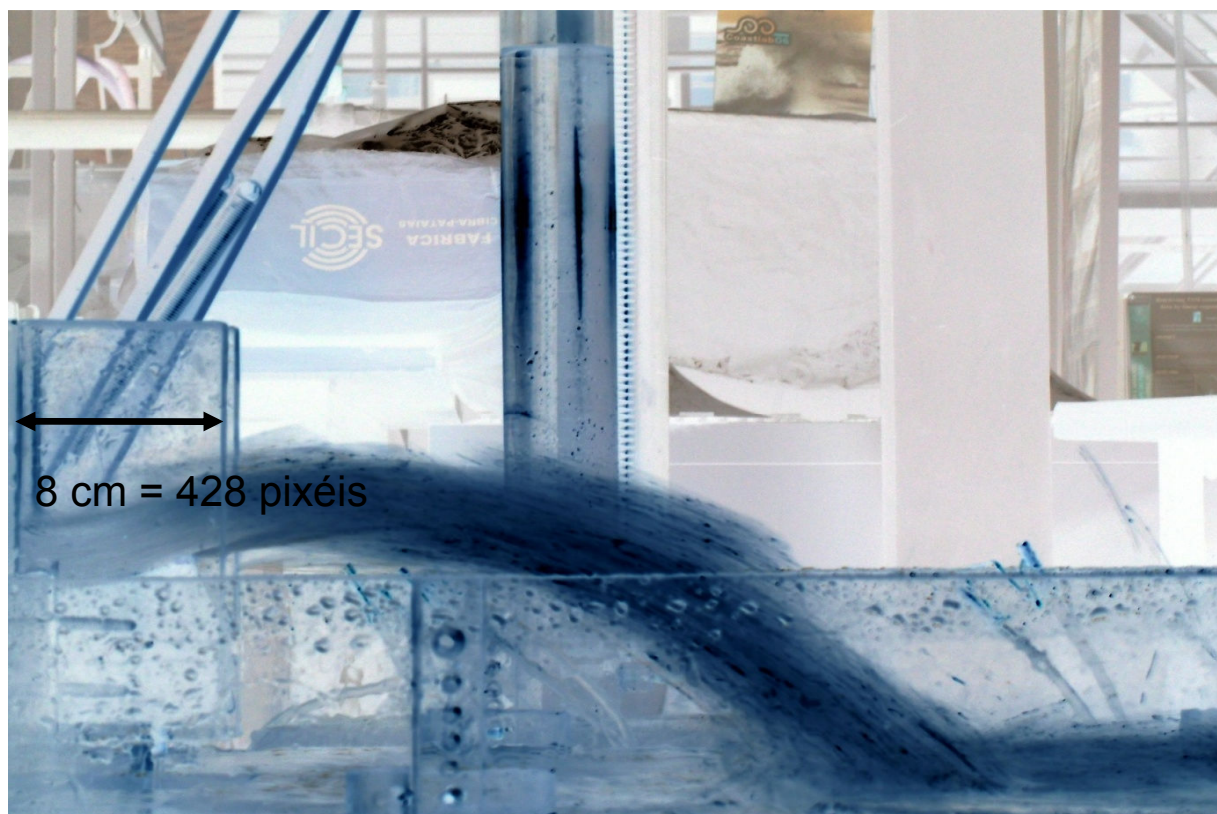


Figura 3.40. - Imagem de calibração do processo de aquisição de imagem

Refere-se ainda que a referência horizontal é igual à vertical, sendo, $\alpha_x = \alpha_y = 0,018692$, ou seja, as distâncias em pixels obtidas pela análise das imagens deverão ser multiplicadas por esse factor de conversão de forma a serem conhecidas as distâncias reais em centímetros.

3.7. CONDIÇÕES DE TESTE

A gama de caudais utilizados em modelo bem como os seus valores correspondentes em protótipo, segundo a semelhança de Froude, espessuras de colchões de água ensaiados e ângulos de saída do trampolim em salto de esqui apresentam-se no seguinte quadro. Para cada tipo de ensaio realizado serão mencionadas as condições de teste específicas consideradas.

Quadro 3.13. – Resumo das condições de teste

Característica	Modelo	Protótipo
Caudal	0,5 a 2,4 l/s	5,06 a 24,29 m ³ /s
Caudal Específico	0,01 a 0,048 m ² /m	2,53 a 12,14 m ² /s
Espessura Colchão	0,01 a 0,05 m	0,4 a 2 m
Ângulo de saída do trampolim	20°	20°

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. APRECIÇÕES GERAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados no âmbito deste estudo. Em simultâneo, para uma melhor organização e compreensão dos resultados, será feita uma análise crítica dos mesmos.

Os ensaios realizados dividem-se em dois grupos. O primeiro grupo de ensaios foi realizado em fundo fixo (placa de perspex) e o segundo em fundo móvel (leito de material granular).

Dentro do primeiro grupo encontram-se os ensaios de determinação de alcance de jactos, das pressões médias no leito do rio e das flutuações de pressão no mesmo ambiente. Já no segundo grupo apenas foram realizados ensaios de levantamento de perfis de erosão.

4.2. ENSAIOS EM FUNDO FIXO

4.2.1. DETERMINAÇÃO DAS TRAJECTÓRIAS DOS JACTOS

Na análise do comportamento dos jactos para as diferentes condições de escoamento foi feita a comparação das suas trajectórias teoricamente calculadas através das expressões (2.1.) e (2.2.) com as trajectórias reais registadas através da técnica de aquisição de imagens.

Nesta fase dos trabalhos, foram considerados os seguintes valores de caudais: 0,51 l/s, 0,71 l/s, 0,85 l/s, 0,99 l/s, 1,27 l/s, 1,77 l/s e 2,40 l/s, que permitiram analisar o comportamento dos sistemas de medição e a determinação de parâmetros fundamentais relativos a características dos jactos, necessários ao desenvolvimento dos trabalhos.

Para a avaliação da trajectória e alcance dos jactos por aplicação da referida expressão é necessária a determinação da velocidade de saída do jacto, no trampolim, U_0 . Os valores desta velocidade foram obtidos, para cada caudal testado, através da medição das alturas de água no lábio do trampolim utilizando o método descrito em 3.4.4. Valores médios dessas alturas foram obtidos, tendo sido requisitado ao sistema de aquisição de dados que adquirisse, para cada condição, 5000 valores com uma frequência de 250 Hz.

Tendo em atenção as características da secção de saída do trampolim, os valores das alturas de água, conjuntamente com o valor do respectivo caudal, em cada situação de escoamento, foi possível obter os valores de velocidade média de saída, por aplicação da equação da continuidade.

Estes valores de velocidade conduziram à determinação dos valores da queda H_0 na secção de saída do trampolim, utilizando a expressão (2.3.) que, conjuntamente com as espessuras dos colchões de água na zona de impacto, permitem determinar os valores de H_1 e a aplicação das expressões (2.1.) ou (2.2.) para determinação das trajectórias dos jactos do trampolim. No quadro 4.1 são apresentados, para os diferentes caudais considerados, os valores das velocidades de saída, U_0 , bem como os valores da queda à saída, H_0 , dos alcances teóricos, L_t , e alcances efectivos, L e os valores dos números de Froude, calculados de acordo com a expressão (2.7.).

Tendo em atenção que a propagação do jacto em condições reais poderá de certa forma alterar a sua trajectória, tal como referido no capítulo 2 deste trabalho, os referidos valores de alcance anteriormente calculados, foram comparados com valores efectivos obtidos utilizando as expressões referidas no mesmo capítulo. Foram assim aplicadas as correcções de Gun'ko e de Kawakami, dado que a expressão de Zvorykin não é aplicável, em virtude da gama de valores da queda à saída do trampolim, H_0 , em que o método é aplicável, não se ajustar às condições presentes. No que se refere aos dois restantes autores mencionados, não introduzem, como se pode verificar pelo quadro 4.1., qualquer modificação no alcance teórico calculado. Gun'ko afirma ser necessária a existência de números de Froude superiores a cerca de 30 para que o alcance efectivo do jacto seja diferente do teórico. Neste estudo o número de Froude máximo que se obteve foi de 10,5 concluindo então que não será aplicável qualquer correcção. Kawakami apenas admite uma redução do alcance teórico para velocidades superiores a cerca de 15 m/s. Neste trabalho, a velocidade máxima, em protótipo, será de 10,44 m/s correspondente a uma velocidade máxima no modelo de 1,65 m/s não havendo, então, igualmente lugar à correcção do alcance teórico calculado

Refira-se também que, paralelamente à determinação das alturas de água, acima descrita, foram captadas, com recurso a máquina fotográfica, imagens do jacto para posterior avaliação da correspondência dos valores obtidos pelas expressões teóricas de alcance de jactos com a realidade verificada em modelo físico. Os valores reais dos alcances dos jactos ocorridos nos ensaios foram obtidos pela técnica de aquisição de imagens, doravante denominada por T.A.I., tendo sido utilizada como referência física, para calibração do sistema, o objecto, de dimensões perfeitamente conhecidas e posição fixa, indicado na figura 4.1..

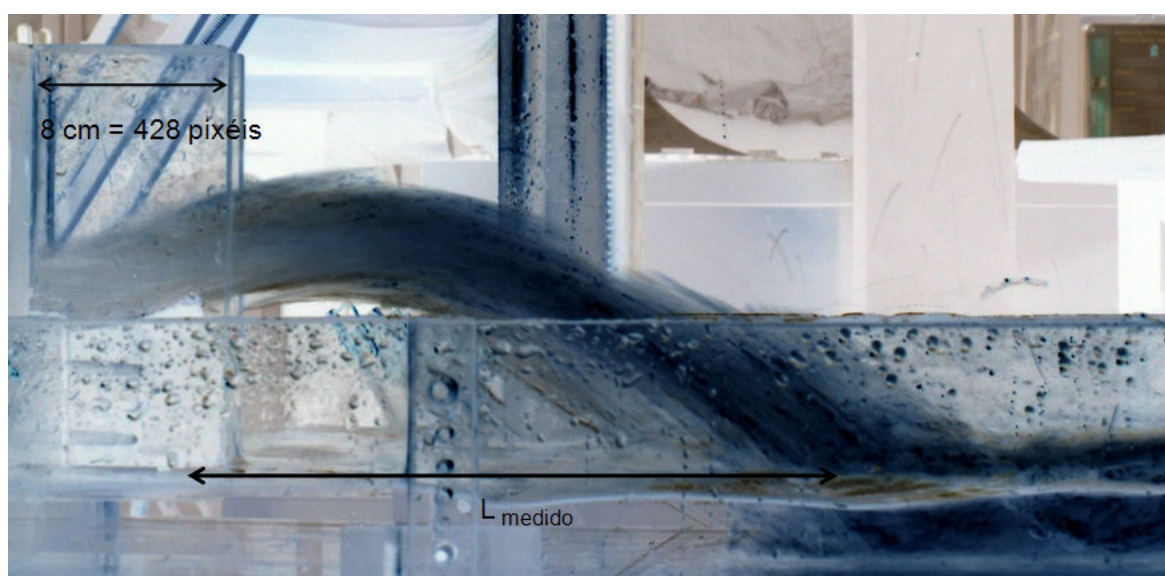


Figura 4.1. - Referência física para aplicação da técnica de aquisição de imagem e determinação correcta do L_{medido}

Refira-se igualmente que, para a determinação do L_{medido} foi medida a distância na horizontal entre o lábio do trampolim do salto de esquí e a secção, considerada, média do jacto na zona de impacto com o colchão de água, tal como indicado na figura anterior.

Os valores dos alcances, L_{medido} , assim obtidos, foram então comparados com os anteriormente calculados, alcances teóricos e efectivos, L_t e L , assinalando-se as diferenças registadas, ΔL , conforme se pode ver no quadro 4.1 e na figura 4.2., a seguir apresentados, que foram elaborados para colchão de água nulo.

Quadro 4.1. - Velocidades de saída e comparação dos alcances teóricos, efectivos e medidos através da T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m)

Q (l/s)	$y_{\text{água}}$ (cm)	U_0 - modelo (m/s)	H_0 (m) - atender à expressão 2.3.	L_t (m)	Fr	L (m)	L_{medido} (m)	ΔL (m)
0,51	1,07	1,05	0,0562	0,1816	10,5	0,1816	0,0994	-0,0821
0,71	1,27	1,14	0,0659	0,2006	10,4	0,2006	0,1462	-0,0544
0,85	1,41	1,20	0,0728	0,2138	10,3	0,2138	0,1699	-0,0439
0,99	1,55	1,25	0,0797	0,2266	10,3	0,2266	0,2037	-0,0228
1,27	1,83	1,35	0,0933	0,2511	10,2	0,2511	0,2510	-0,0001
1,77	2,33	1,51	0,1156	0,2896	9,9	0,2896	0,2895	0,0000
2,40	2,97	1,65	0,1385	0,3274	9,3	0,3274	0,3271	-0,0003

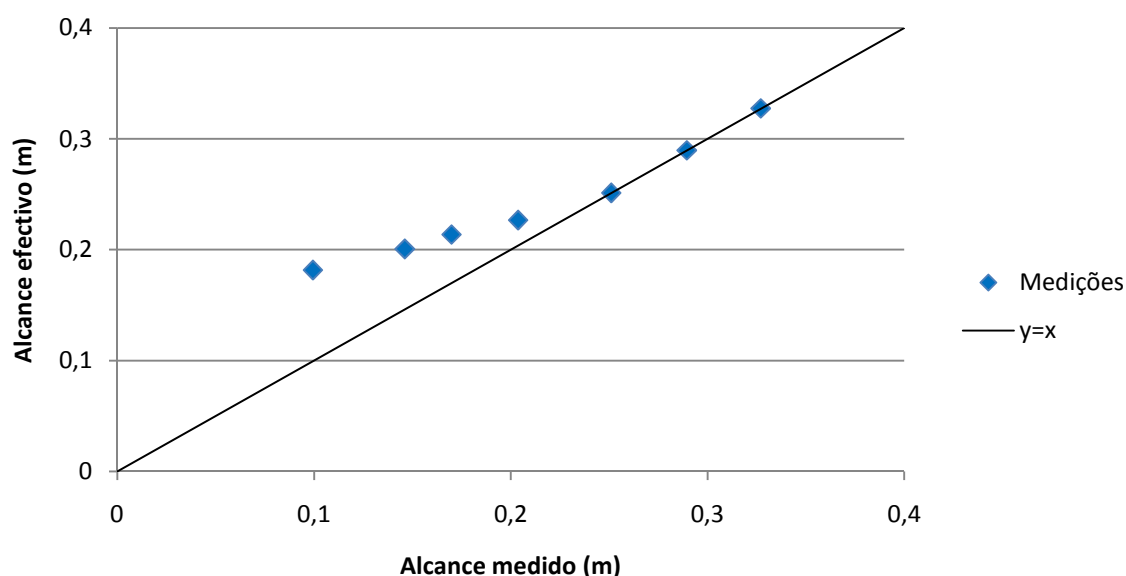


Figura 4.2. – Representação gráfica da comparação dos alcances teóricos, efectivos e medidos através da T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m)

Foram ainda analisados os ângulos de incidência (ou de impacto) do jacto no colchão de água a jusante. À semelhança do que foi feito para o alcance dos jactos, foram igualmente determinados ângulos de incidência teóricos, θ'_t , utilizando a expressão (2.4.), que foram comparados com os ângulos de incidência medidos através da T.A.I., θ'_{medido} , tal como se mostra no quadro 4.2. e na figura 4.3., onde são apresentados os desvios, $\Delta\theta'$, para as mesmas condições de colchão de valor nulo, como no quadro anterior. Estes ângulos foram utilizados para a validação da aplicação da T.A.I. e, posteriormente na aplicação de algumas fórmulas de previsão da fossa de erosão máxima como se verá mais adiante.

Quadro 4.2. - Valores dos ângulos de impacto teóricos θ'_t e comparação com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m)

Q (l/s)	θ'_t (graus)	θ'_{medido} (graus)	$\Delta\theta'$ (graus)
0,51	55,69	67,13	11,44
0,71	53,69	60,43	6,74
0,85	52,42	56,73	4,31
0,99	51,27	53,51	2,24
1,27	49,25	49,44	0,19
1,77	46,52	46,45	-0,07
2,40	44,27	44,35	0,08

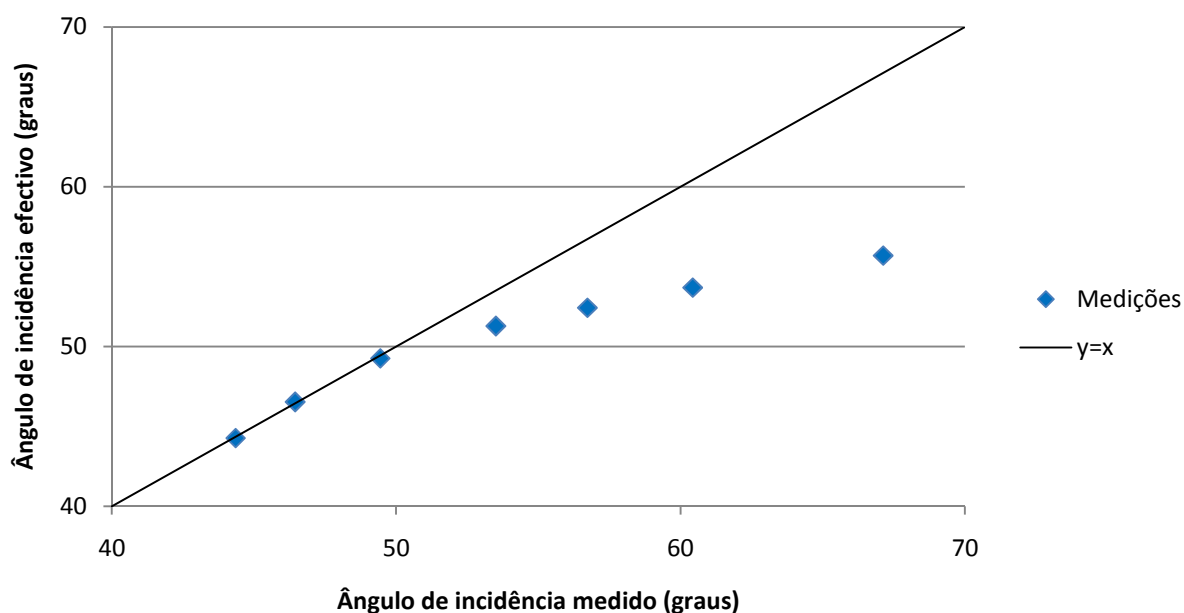


Figura 4.3. – Representação gráfica da comparação dos ângulos de impacto teóricos θ'_t com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0,1$ m)

Pela análise dos quadros 4.1. e 4.2., é possível concluir que, entre 0,51 l/s e 0,99 l/s, as previsões teóricas do alcance do jacto e do ângulo de incidência não são suportadas pelas imagens fotográficas captadas. No entanto, para os caudais superiores (1,27, 1,77 e 2,40 l/s) obtêm-se previsões muito satisfatórias relativamente aos dois parâmetros estudados. No quadro 4.3. e nas figuras 4.4 e 4.5. apresentam-se, no caso do caudal de 0,51 l/s para diferentes valores do colchão de água na zona de impacto, os valores dos alcances e ângulos de impacto dos jactos, teóricos e medidos, que suportam, de forma mais pormenorizada, a afirmação atrás feita.

Quadro 4.3. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (m)	L_{medido} (m)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (m)	θ'_t (graus)	ΔL (m)	$\Delta\theta'$ (graus)
0,00	0,0994	1,05	0,0562	0,10	0,1816	55,69	-0,0821	11,44
0,01	0,0955	1,05	0,0562	0,09	0,1746	54,37	-0,0790	11,87
0,02	0,0903	1,05	0,0562	0,08	0,1672	52,87	-0,0769	11,60
0,03	0,0854	1,05	0,0562	0,07	0,1594	51,17	-0,0740	11,99
0,04	0,0796	1,05	0,0562	0,06	0,1511	49,20	-0,0714	12,69
0,05	0,0742	1,05	0,0562	0,05	0,1421	46,88	-0,0679	12,51

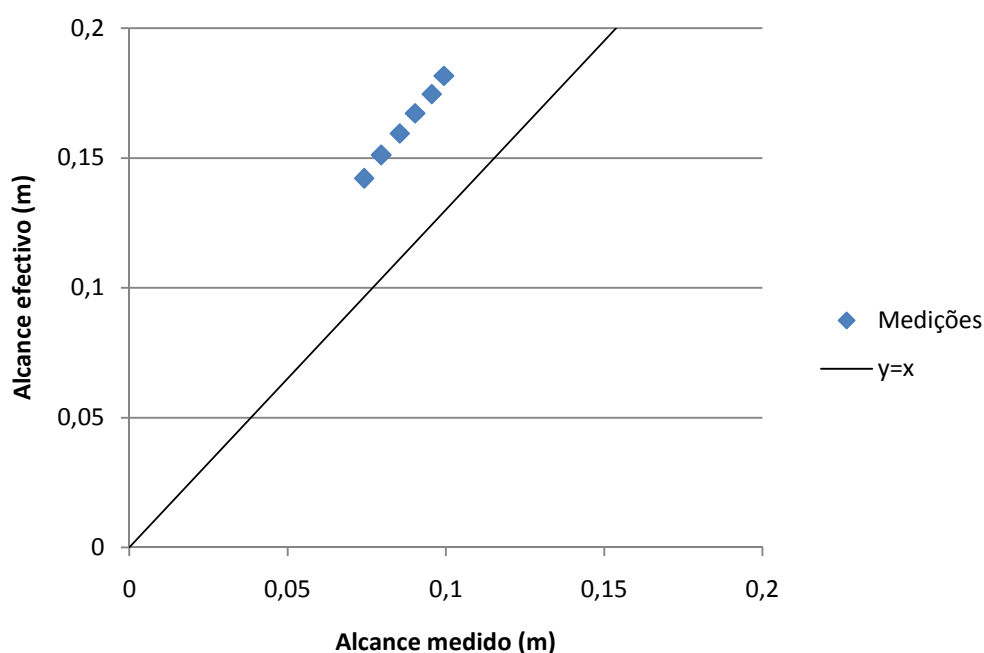


Figura 4.4. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água

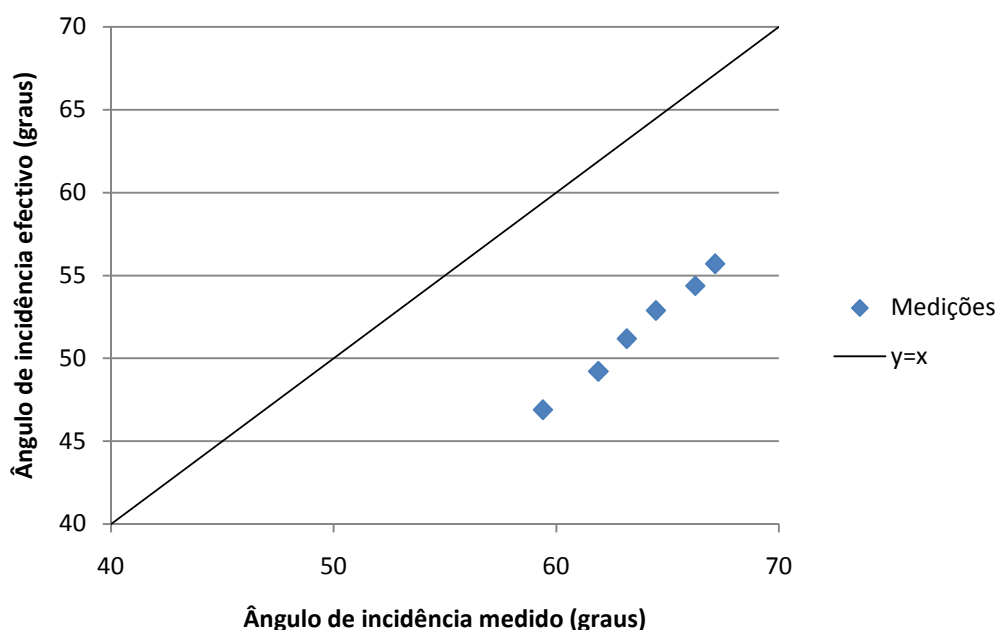


Figura 4.5. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água

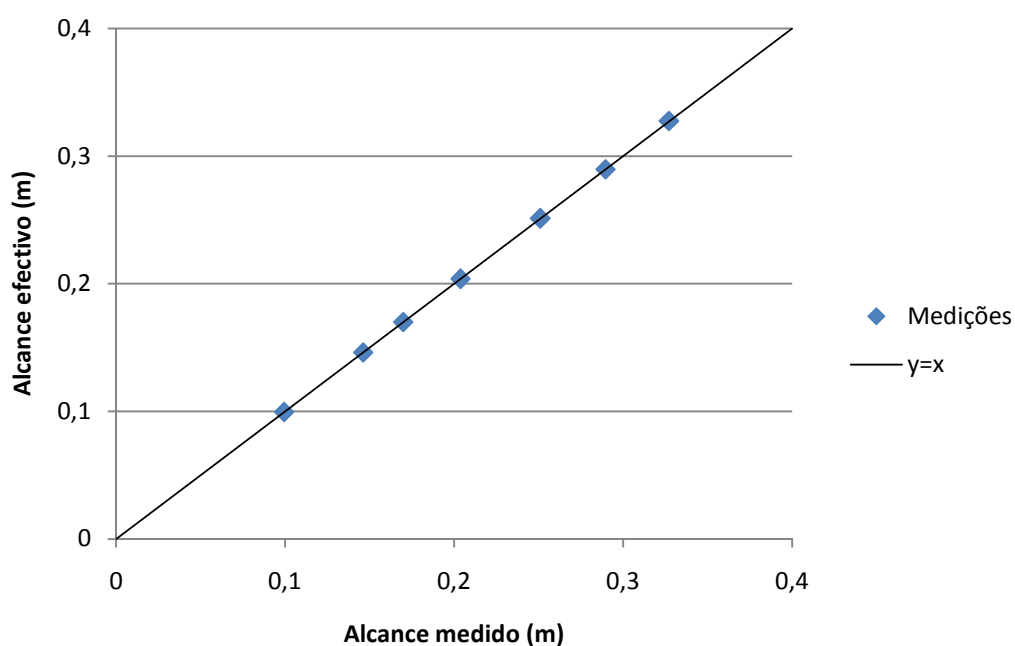
Analizados os escoamentos e os meios de medida utilizados concluiu-se que tal se deve ao facto de o tipo de escoamento dos caudais inferiores ser do tipo semelhante ao que é apresentado na figura 2.13. e os restantes caudais se inserirem no tipo de escoamento mostrado pelo esquema da figura 2.14..

Analizando o comportamento do flutuador no primeiro caso verificou-se que devido ao afogamento do ressalto, ocorre também, a submersão frequente do flutuador originando alturas de água inferiores à realidade e, consequentemente, a velocidades de saída superiores às reais, o que resulta numa sobrestimação do alcance do jacto.

Tendo concluído que, para os caudais em que se verifica o tipo de escoamento da figura 2.13., os valores das velocidades de saída do jacto do trampolim em salto de esqui estão incorrectos, procedeu-se, então, à determinação do valor real da velocidade de saída. Para isso recorreu-se ao registo da trajectória real dos jactos obtidos através do registo fotográfico. Introduzindo na expressão (2.1.) o alcance obtido pela T.A.I. para cada caso, foi determinada a velocidade real de saída. Utilizando os valores de velocidade de saída corrigidos, para os caudais de valores mais reduzidos, foram recalculados os alcances e ângulos de impacto teóricos e feita a comparação com os valores adquiridos anteriormente pela técnica de aquisição de imagens, sendo esta comparação apresentada nos quadros 4.4 a 4.6 e nas figuras 4.6 a 4.9. (alterações provocadas pela correcção de velocidades serão assinaladas a azul nos quadros 4.4. e 4.5. e 4.6.).

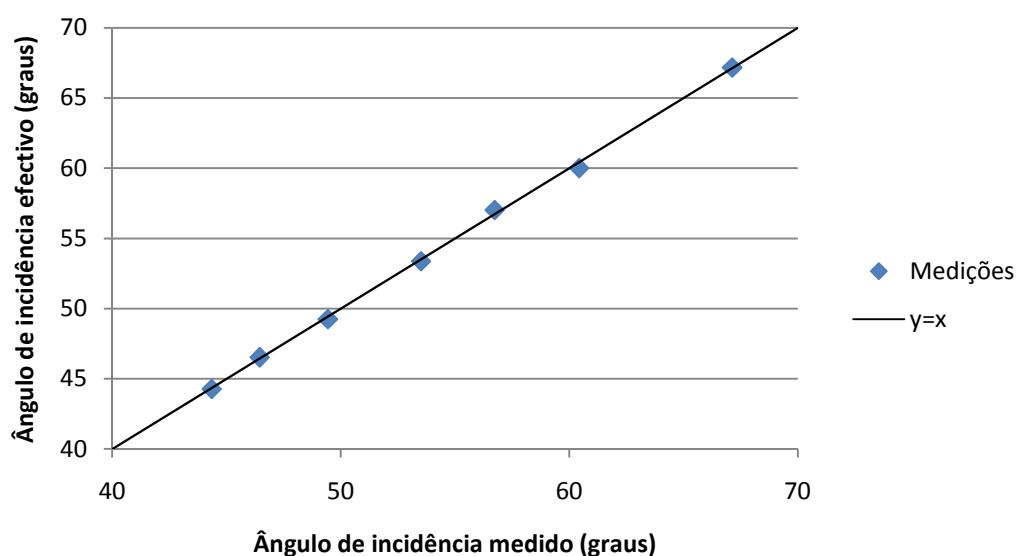
Quadro 4.4. - Comparação dos alcances efectivos com os valores obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades

Q (l/s)	U_0 - modelo (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (m)	L (m)	L_{medido} (m)	ΔL (m)
0,51	0,64	0,0206	0,10	0,0994	0,0994	0,0994	0,0000
0,71	0,88	0,0395	0,10	0,1462	0,1462	0,1462	0,0000
0,85	1,00	0,0505	0,10	0,1699	0,1699	0,1699	0,0000
0,99	1,15	0,0675	0,10	0,2037	0,2037	0,2037	0,0000
1,27	1,35	0,0933	0,10	0,2511	0,2511	0,2510	-0,0001
1,77	1,51	0,1156	0,10	0,2896	0,2896	0,2895	0,0000
2,40	1,65	0,1385	0,10	0,3274	0,3274	0,3271	-0,0003

Figura 4.6. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os valores obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades

Quadro 4.5. - Comparação dos ângulos de impacto teóricos com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidades

Q (l/s)	θ'_t (graus)	θ'_{medido} (graus)	$\Delta\theta'$ (graus)
0,51	67,17	67,13	-0,04
0,71	60,00	60,43	0,43
0,85	57,02	56,73	-0,29
0,99	53,38	53,51	0,13
1,27	49,25	49,44	0,19
1,77	46,52	46,45	-0,07
2,40	44,27	44,35	0,08

Figura 4.7. – Representação gráfica da comparação dos ângulos de impacto teóricos com os obtidos pela T.A.I. para o caso de colchão de água nulo ($H_1=0$ m) após correcção de velocidadesQuadro 4.6. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (m)	L_{medido} (m)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (m)	θ'_t (graus)	ΔL (m)	$\Delta\theta'$ (graus)
0,00	0,0994	0,64	0,0206	0,10	0,0994	67,17	0,0000	-0,04
0,01	0,0955	0,64	0,0206	0,09	0,0951	66,10	0,0004	0,14
0,02	0,0903	0,64	0,0206	0,08	0,0906	64,86	-0,0003	-0,39
0,03	0,0854	0,64	0,0206	0,07	0,0857	63,40	-0,0003	-0,24
0,04	0,0796	0,64	0,0206	0,06	0,0805	61,66	-0,0009	0,23
0,05	0,0742	0,64	0,0206	0,05	0,0749	59,52	-0,0007	-0,13

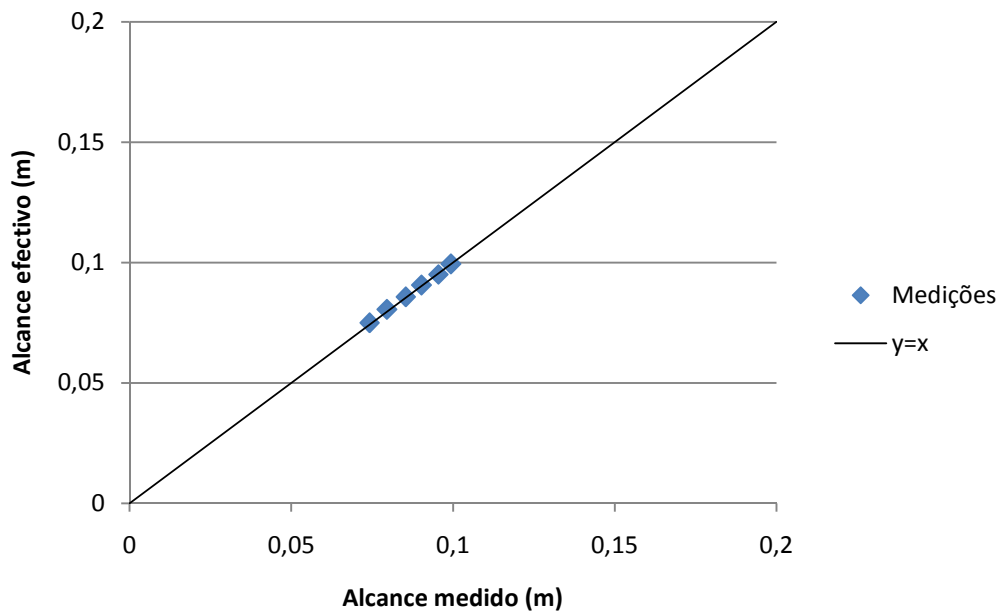


Figura 4.8. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

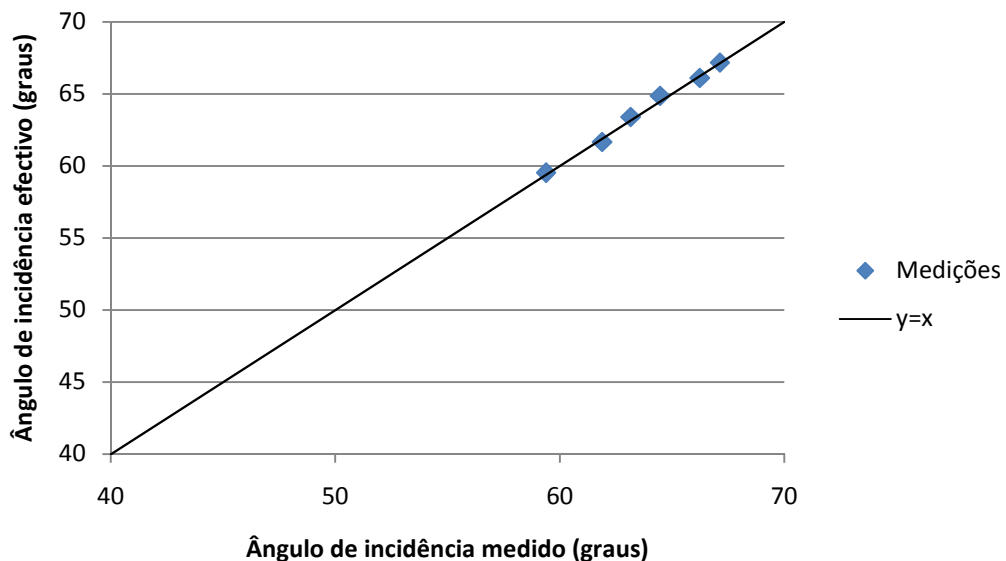


Figura 4.9. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

Como se pode verificar, pela análise dos quadros 4.4., 4.5. e 4.6., as diferenças entre os alcances e ângulos de incidência teóricos e os mesmos parâmetros obtidos pela T.A.I. são muito reduzidas. No anexo II encontram-se os quadros, e respectivas representações gráficas, relativos à comparação dos dois parâmetros estudados neste subcapítulo para todos os caudais e colchões de água, antes e após a correcção de velocidades, considerados neste trabalho.

Pode então dizer-se que as expressões teóricas de trajectória de jactos são completamente suportadas pela T.A.I., sendo também correcto afirmar que esta técnica se revelou bastante fiável e expedita.

Após esta fase dos trabalhos ficaram determinados, todos os valores da queda à saída do trampolim H_0 e consequentemente as quedas na zona de impacto, H , correspondentes, os quais irão ser utilizadas posteriormente nos cálculos realizados para previsão da profundidade máxima das fossas de erosão ocorridas nos ensaios.

4.2.2. MEDIÇÃO DE PRESSÕES MÉDIAS

Com o intuito de analisar as condições de pressão no fundo do canal de restituição foram medidas, para diferentes caudais e diferentes espessuras de colchão, as pressões médias, tendo sido utilizados equipamento e métodos descritos no subcapítulo 3.4.2.. As medições foram realizadas através de tomadas de pressão existentes na placa de perspex que funciona como fundo fixo do referido canal. Foram utilizadas, devido ao escasso tempo disponível apenas as tomadas de pressão situadas no alinhamento do eixo do trampolim descarregador. A estas tomadas de pressão foram conectados os tubos piezométricos já instalados nas paredes do reservatório que constitui a base do canal de restituição (Figura 4.10.).

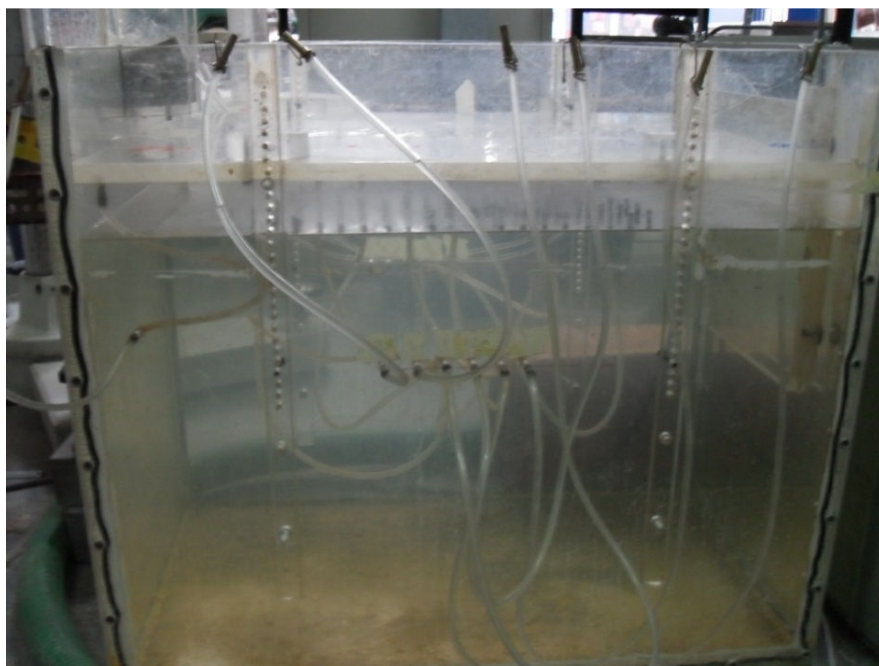


Figura 4.10. - Reservatório de jusante equipado com tubos piezométricos

Os tubos piezométricos permitiam obter, por leitura directa, as pressões instaladas nos pontos de medição. No entanto, como já foi referido, foi utilizado um transdutor diferencial de pressão, ligado ao sistema de aquisição para uma mais rápida e precisa aquisição de dados. Neste caso, e em virtude da grande turbulência do escoamento e consequentemente das características do sinal de pressão daí resultante foi considerada uma taxa de aquisição bastante elevada. Assim o número de dados adquiridos pelo sistema de aquisição, para estes ensaios, de 500000 com uma frequência de 5000 Hz.

As condições de escoamento para estes ensaios foram as seguintes, no que se refere a valores de caudais e espessuras do colchão de água. Os caudais considerados inicialmente foram 0,51 l/s, 0,71 l/s e 0,85 l/s, tendo para cada um deles sido utilizados cinco espessuras de colchão de água na zona de impacto com os valores de 1cm, 2cm, 3cm, 4cm e 5cm. Foram ainda analisados, de forma menos

exaustiva, os seguintes valores de caudais 0,99, 1,27, 1,77 e 2,40 l/s em virtude do referido anteriormente, em 3.4.6., relativo às questões surgidas com a impossibilidade do completo desenvolvimento das fossas, relacionado com as dimensões do canal de restituição utilizado para realização dos ensaios. Dado o interesse em relacionar as medidas relativas a pressões com as dimensões das fossas geradas, o não completo desenvolvimento destas tornou estes caudais menos interessantes para este estudo.

Nos ensaios realizados com os caudais 0,51 l/s, 0,71 l/s e 0,85 l/s, os tubos piezométricos foram posicionados para que a tomada de pressão S2 (Figura 4.11.) estivesse localizada no ponto de impacto do jacto correspondente ao caudal descarregado. Nestes casos em que foram medidos oito pontos de pressão, espaçados entre si de 4,76 cm, sendo, a disposição das tomadas de pressão a seguinte: uma tomada de pressão a montante da tomada de pressão que recebe directamente o impacto do jacto e seis a jusante do mesmo.

Nos caudais 0,99, 1,27, 1,77 e 2,40 l/s, por questões de disponibilidade de tempo foram medidas apenas valores médios de pressão em quatro pontos, igualmente espaçados, com disposição idêntica à anterior, exceptuando o número de tomadas de pressão a jusante do ponto de impacto que neste caso será de dois em vez de seis.

A cada mudança de caudal corresponderá uma desconexão dos tubos piezométricos das tomadas a que se encontram ligados e, consoante o alcance do jacto do caudal descarregado, e a sua aplicação nas tomadas de pressão correspondentes segundo a disposição já descrita.

Refira-se ainda que a altura do colchão de água, designado por h , presente no leito do canal de restituição, para cada condição de teste, foi determinada recorrendo a uma tomada de pressão adicional, suficientemente afastada do local de queda do jacto para que não se fizessem sentir as influências da queda do mesmo (Figura 3.9.).

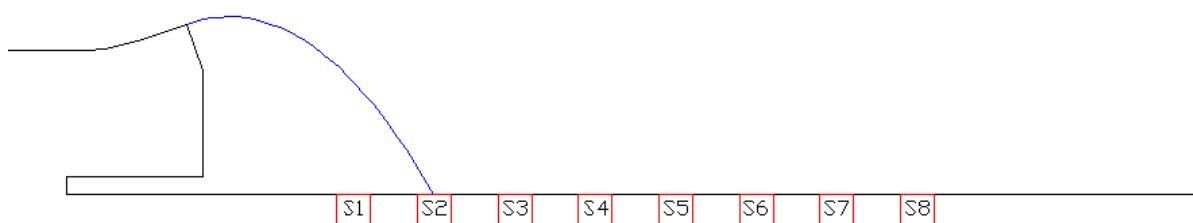


Figura 4.11. - Disposição das tomadas de pressão medidas, na placa de perspex, relativamente ao caudal descarregado

De seguida apresentam-se, nos quadros 4.7., 4.8., 4.9, 4.10 e 4.11., os valores das pressões médias, registados nas tomadas de pressão anteriormente designadas de S1 a S8, para o caudal de 0,71 l/s e para as cinco espessuras dos colchões de água de 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm e 5 cm., encontrando-se no anexo III os resultados referentes aos restantes caudais. Nos quadros são apresentados para além dos registos das pressões médias o valor da pressão exercida pelo colchão de água, h , em ponto suficientemente afastado.

Quadro 4.7. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,71	1,03
S1	0,71	0,64
S2	0,71	2,35
S3	0,71	0,72
S4	0,71	-0,54
S5	0,71	-0,44
S6	0,71	0,48
S7	0,70	1,15
S8	0,70	0,99

Quadro 4.8. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,70	1,97
S1	0,71	1,79
S2	0,70	2,86
S3	0,71	1,54
S4	0,71	1,71
S5	0,71	1,88
S6	0,71	1,89
S7	0,70	1,96
S8	0,70	1,98

Quadro 4.9. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,70	2,99
S1	0,71	2,85
S2	0,70	3,65
S3	0,70	3,06
S4	0,71	2,85
S5	0,71	2,86
S6	0,71	2,97
S7	0,71	3,01
S8	0,71	3,00

Quadro 4.10. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,71	3,99
S1	0,71	3,84
S2	0,71	4,40
S3	0,71	4,07
S4	0,71	3,81
S5	0,70	3,84
S6	0,71	3,89
S7	0,70	3,92
S8	0,70	3,95

Quadro 4.11. - Ensaios de determinação de pressões médias para Q=0,71 l/s e h≈5 cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,70	5,02
S1	0,70	4,95
S2	0,71	5,30
S3	0,71	5,19
S4	0,70	4,94
S5	0,70	4,95
S6	0,71	5,03
S7	0,70	5,03
S8	0,71	5,03

Pela análise dos quadros acima apresentados verifica-se um aumento de pressão em relação à exercida pelo colchão no ponto de impacto enquanto que, nos pontos situados a montante e nos pontos localizados a jusante e mais próximos do ponto de impacto, haverá uma diminuição dessa pressão. O afastamento para jusante leva à diminuição dessa variação. Estes aumentos de pressão serão importantes já que poderão provocar assentamentos diferenciais que serão fundamentais para o dimensionamento estrutural da bacia de dissipação. Para o colchão de água de menor espessura (1 cm) atingem-se pressões médias negativas como se pode comprovar pelo quadro 4.7..Tal facto é também comprovado pelos quadros presentes no anexo III. Faz-se notar que, para os caudais em que apenas se realizaram medições para quatro tomadas de pressão, nem sempre foi possível encontrar as pressões negativas que seriam expectáveis, devido à menor pormenorização dos ensaios relativamente aos anteriores, sendo previsível que, se fossem medidos os oito pontos de pressão para todos os caudais seriam, então, encontradas as referidas pressões negativas.

Seguidamente analisou-se de forma mais pormenorizada a variação de pressão registada na tomada de pressão S2, ponto de impacto do jacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água no fundo do canal de restituição ou seja no simulado leito do curso de água. Considerou-se para essa análise a variação percentual em relação a essa pressão do colchão de água fora da zona perturbada do escoamento, traduzida pela expressão (4.1.). O cálculo dessa variação foi feito para todos os caudais ensaiados, em função das espessuras de colchão de água já referidas, sendo apresentado, seguidamente, nos quadros 4.12 a 4.18. e graficamente nas figuras 4.12. a 4.18..

$$Var. Perc. = \frac{Pressão_{Si} - h}{h} \cdot 100\% \quad (4.1.)$$

Quadro 4.12. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,51$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
0,99	1,65	67,75%
2,03	2,37	16,58%
3,01	3,24	7,66%
4,01	4,17	3,81%
5,01	5,12	2,20%

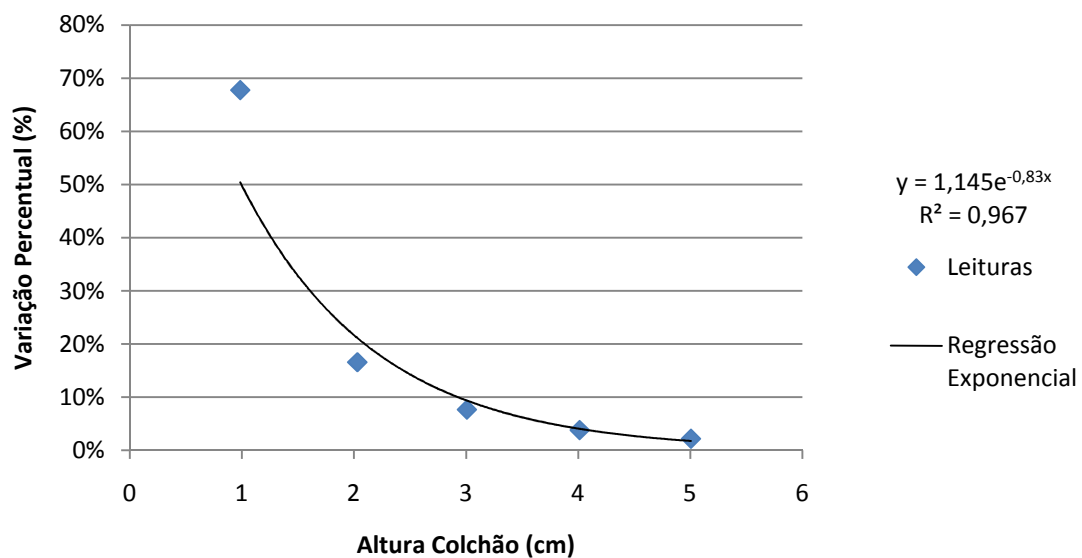


Figura 4.12. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,51$ l/s

Quadro 4.13. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,71$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
1,03	2,35	127,52%
1,97	2,86	45,38%
2,99	3,65	22,16%
3,99	4,40	10,16%
5,02	5,30	5,53%

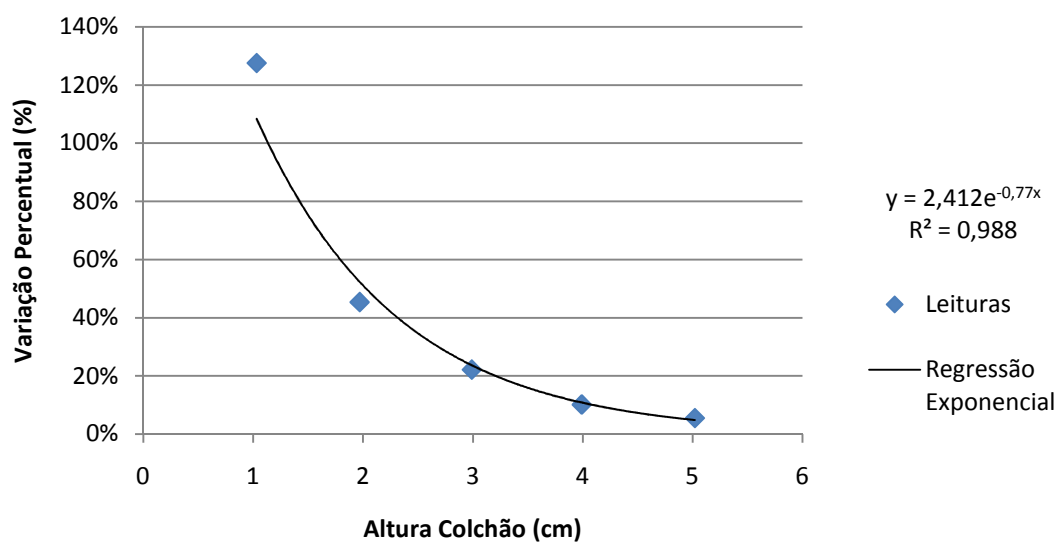


Figura 4.13. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,71$ l/s

Quadro 4.14. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,85$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
0,97	2,74	183,18%
2,05	2,99	45,64%
3,04	3,79	24,73%
4,02	4,66	15,96%
5,02	5,42	8,02%

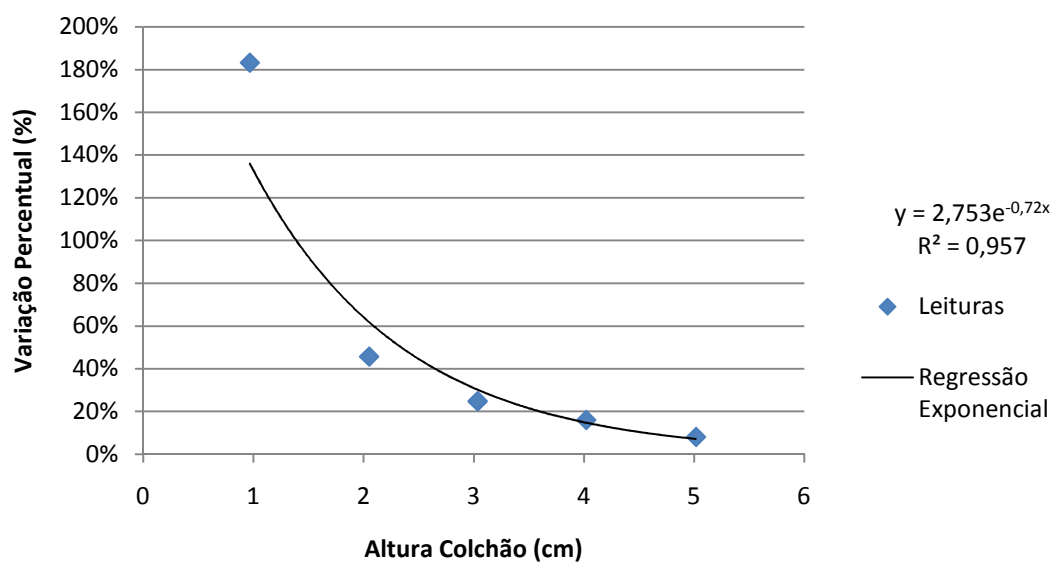


Figura 4.14. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,85$ l/s

Quadro 4.15. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,99$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
1,07	2,93	174,70%
2,07	3,18	53,33%
3,04	3,81	25,40%
4,03	4,64	15,10%
4,96	5,39	8,49%

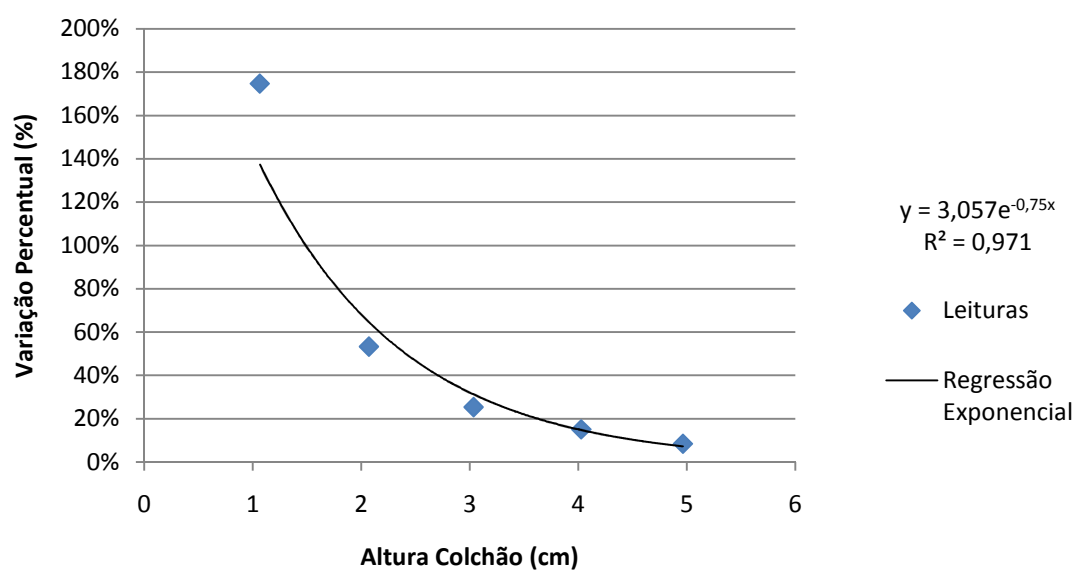


Figura 4.15. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=0,99$ l/s

Quadro 4.16. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,27$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
1,03	4,06	292,79%
2,05	3,58	70,70%
3,01	3,84	27,70%
3,95	4,41	11,74%
4,96	5,32	7,31%

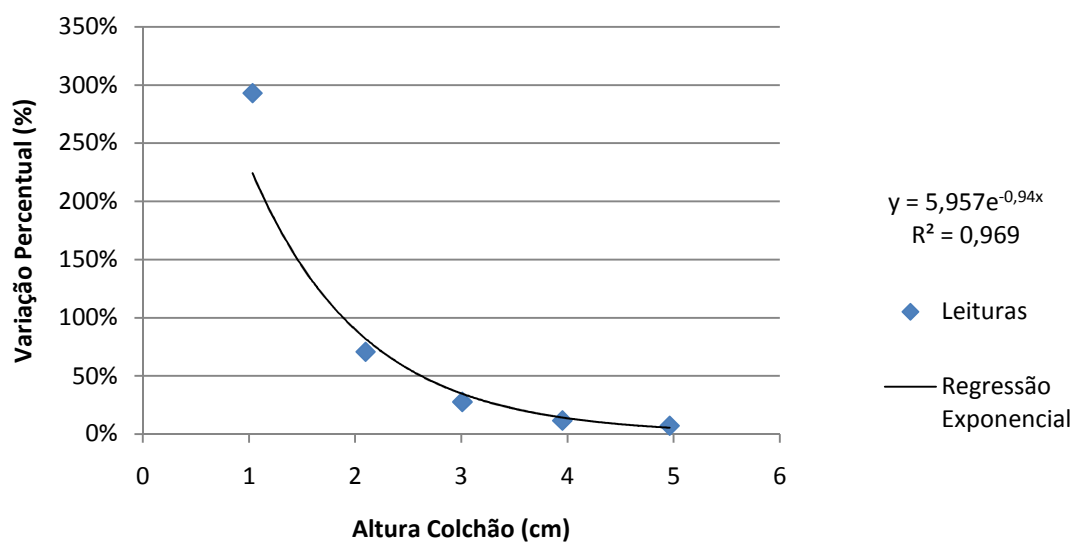


Figura 4.16. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,27$ l/s

Quadro 4.17. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,77$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
1,03	4,48	335,55%
1,98	4,41	122,68%
2,99	4,47	49,51%
3,98	4,76	19,70%
5,03	5,61	11,69%

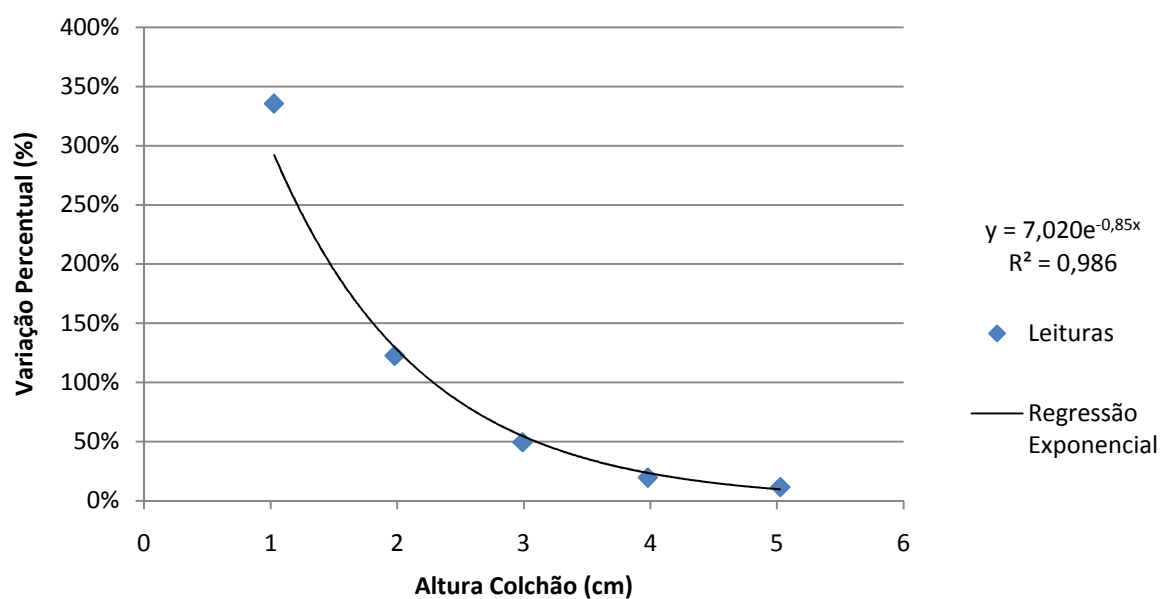


Figura 4.17. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=1,77$ l/s

Quadro 4.18. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=2,40$ l/s

h (cm)	Pressão S2 (cm.c.a.)	Var. Perc. S2 (%)
1,01	6,10	505,94%
2,04	5,35	162,57%
2,99	5,61	87,62%
4,03	5,63	39,75%
5,06	6,07	19,92%

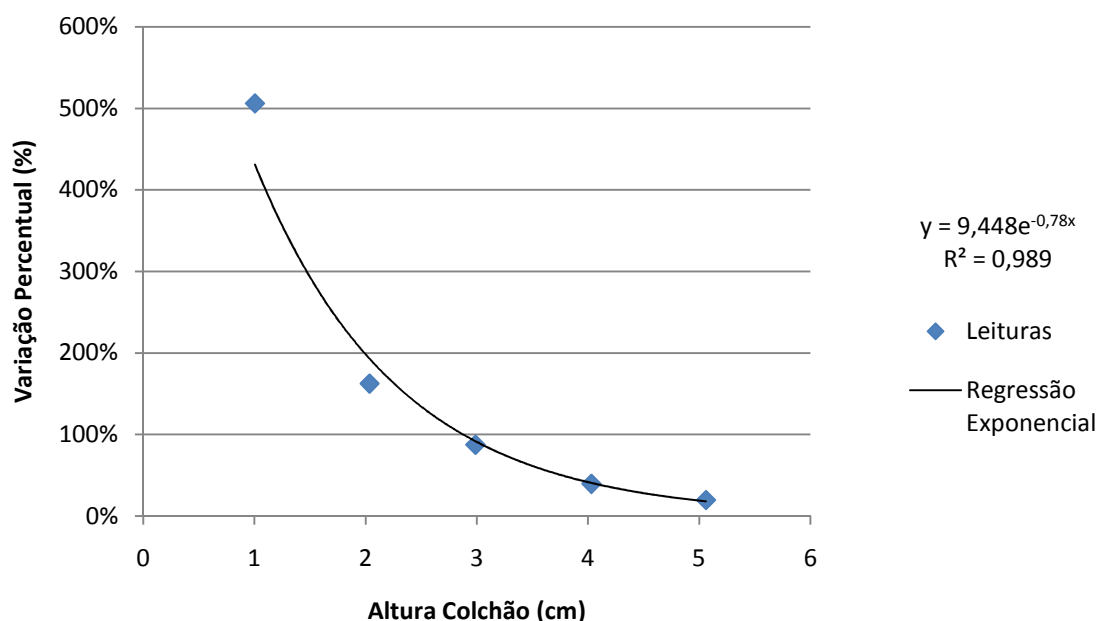


Figura 4.18. - Variação da pressão no ponto de impacto em relação à pressão do colchão de água em zona não perturbada para $Q=2,40$ l/s

Relativamente à análise da variação de pressão no ponto de impacto do jacto, para um mesmo caudal e considerando as várias espessuras de colchão de água, deverá referir-se o efeito amortecedor do colchão de água e que a tradução dessa variação em função da espessura desses mesmos colchões segue uma lei exponencial diminuindo com o aumento deste colchão e aproximando-se tendencialmente para zero. Quanto às linhas de tendência obtidas para a previsão da variação de pressão deve-se referir a excelente qualidade do ajuste das mesmas, tendo-se encontrado coeficientes de correlação muito próximos da unidade (máximo de 0,989 e mínimo de 0,957). No decorrer dos ensaios foram registados valores máximos de variação percentual de 505,94% para o colchão mínimo de água com um caudal de 2,4 l/s e mínimos de 2,20% para o extremo oposto com um colchão de 5 cm de água e 0,5 l/s.

Fez-se ainda a representação, para cada valor da espessura do colchão de água, da anteriormente referida variação percentual da pressão no ponto de impacto, em função do caudal descarregado sendo de seguida apresentados os respectivos gráficos nas figuras 4.19 a 4.23..

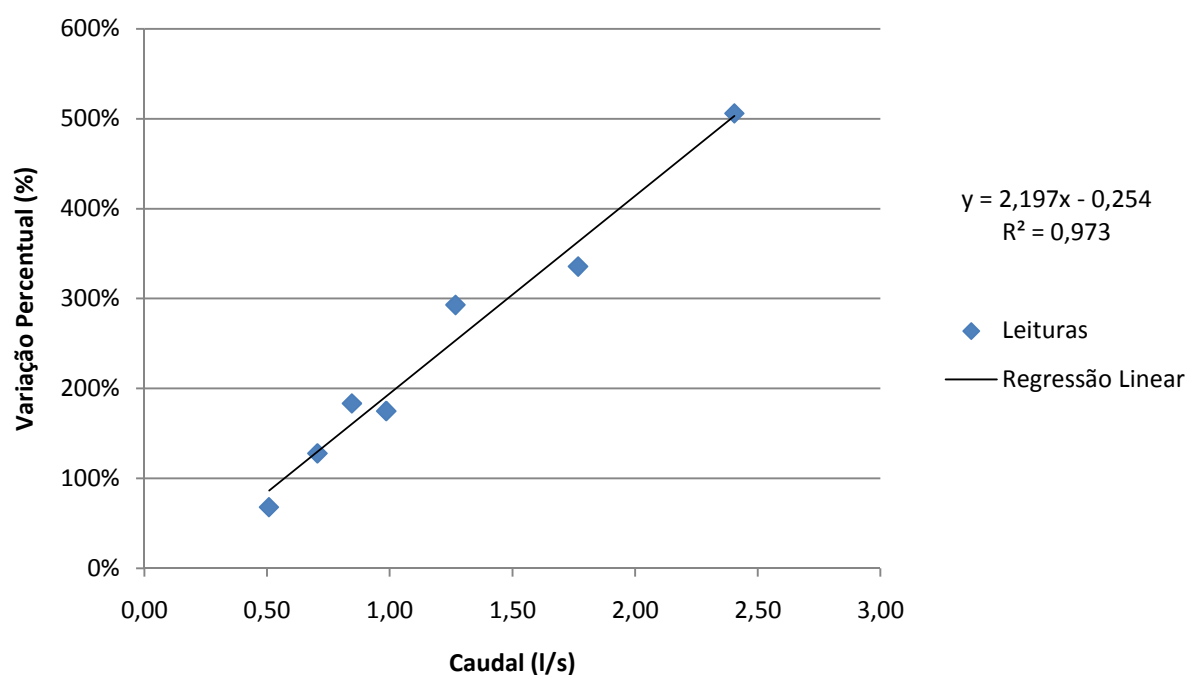


Figura 4.19. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 1$ cm

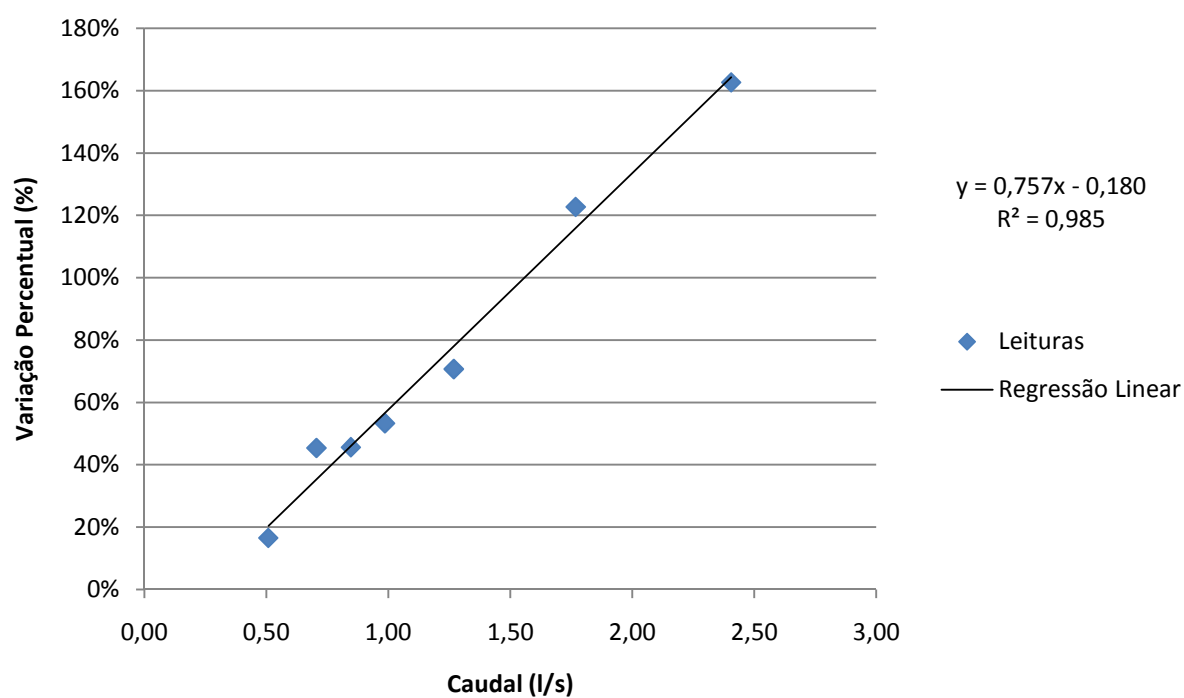


Figura 4.20. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 2$ cm

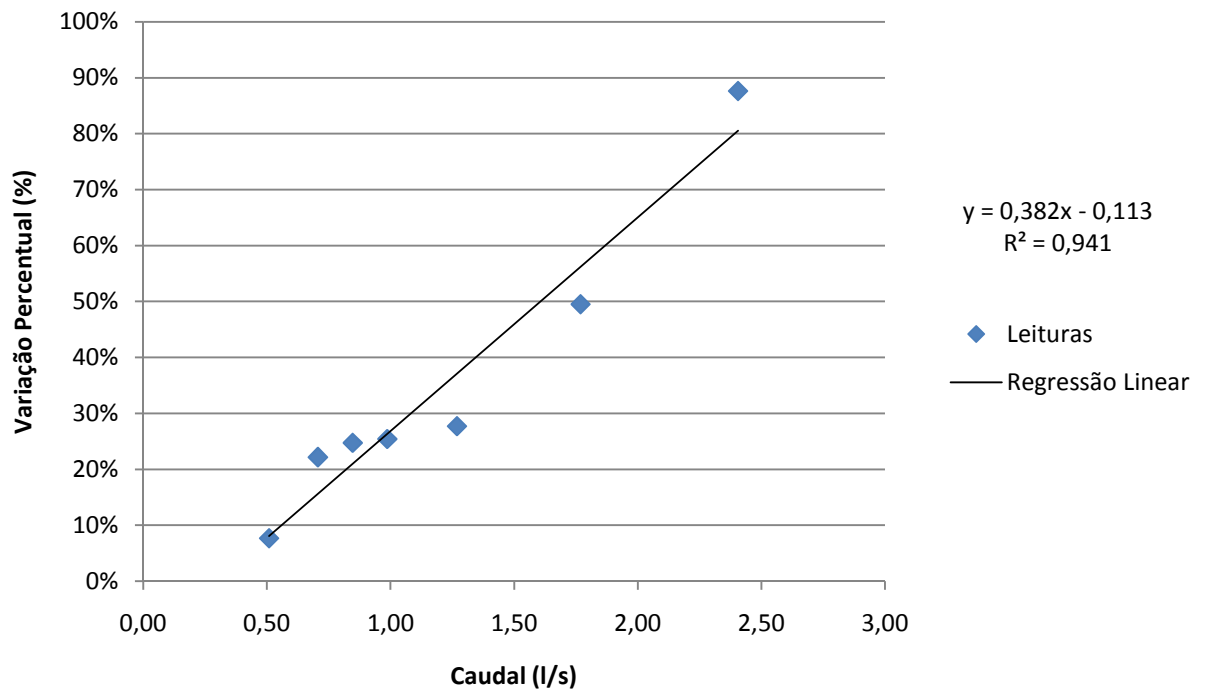


Figura 4.21. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 3$ cm

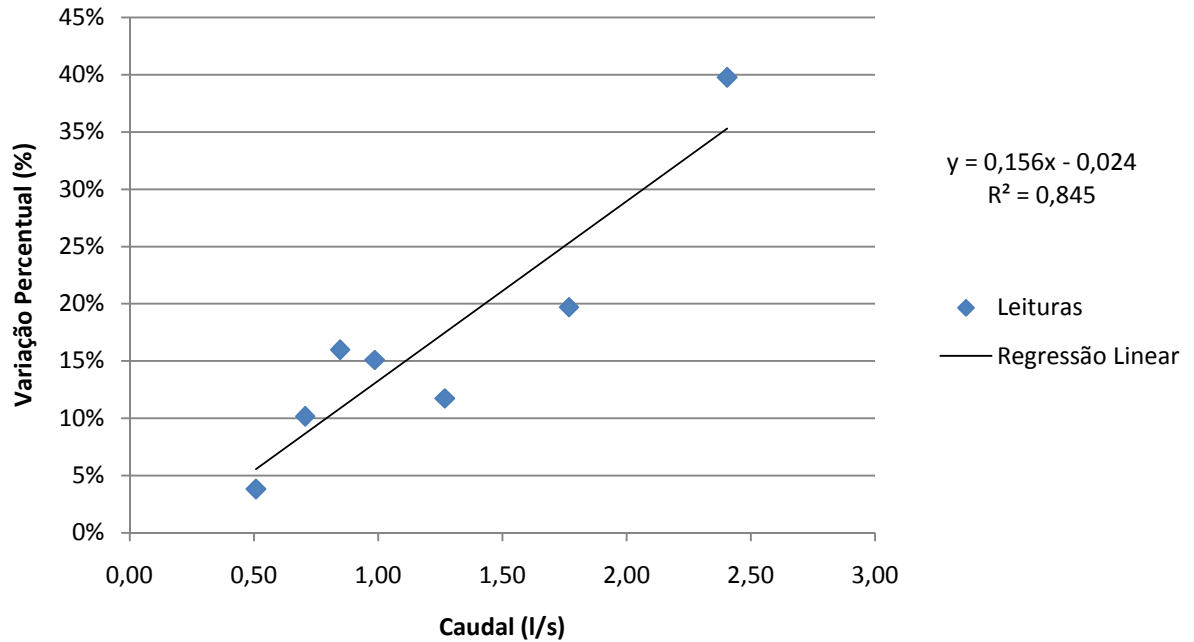


Figura 4.22. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 4$ cm

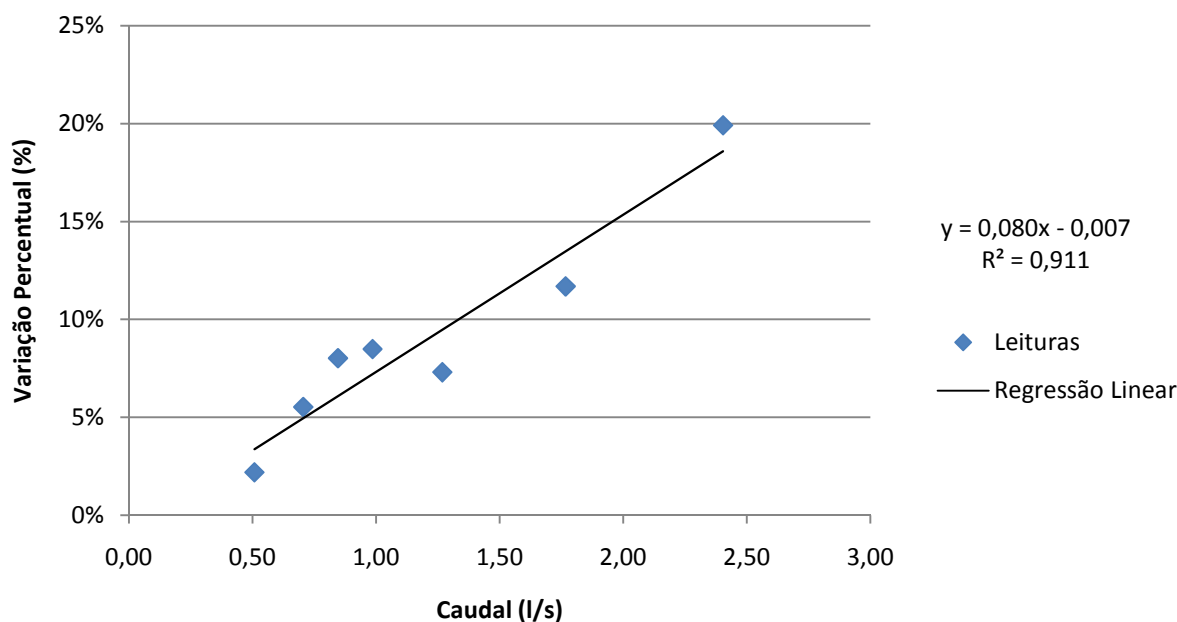


Figura 4.23. - Variação percentual da pressão na zona de impacto, em relação à pressão exercida pelo colchão de água, em função do valor do caudal descarregado para $h \approx 5$ cm

No que se refere ao estudo das variações de pressões causadas na zona de impacto do jacto para uma determinada espessura do colchão de água, em função do caudal descarregado, verifica-se, neste caso, uma evolução aproximadamente linear da variação percentual da pressão. Assim, como seria de esperar, foi observada uma diminuição dessa variação percentual com a redução do caudal descarregado. O ajuste das linhas de tendência que se ajustam aos dados experimentais adquiridos é também de boa qualidade (coeficiente de correlação máximo de 0.985) tendo-se obtido, no entanto, uma recta de menor qualidade para o colchão de água de 4 cm em que são notórios dois valores mais discrepantes para os caudais de 1,27 l/s e 1,77 l/s (coeficiente de correlação mínimo de 0.845). Estes valores discordantes poderão ter sido resultantes de algum problema durante a recolha e tratamento de dados.

4.2.3. MEDIÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

A utilização do método de medição de pressões com utilização de tubos piezométricos não permite o registo de flutuações de pressão, que careceria de transdutor adequado, não disponível para estes ensaios.

No entanto e como referido por alguns investigadores como Lencastre [34], as flutuações turbulentas do escoamento têm grande influência nos fenómenos de dissipação de energia, pelo que se considerou necessário a sua avaliação, tendo-se então tomado a decisão de utilizar o equipamento e a técnica apresentados, anteriormente, em 3.4.3..

As medições foram realizadas nos mesmos pontos considerados para as medições das pressões médias, colocando as sondas sobre as tomadas de pressão utilizadas anteriormente de modo a que o centro geométrico da sonda piezo-eléctrica coincidissem com o centro da tomada de pressão da placa de perspex que constitui o fundo fixo do canal de restituição (Figura 4.24.).

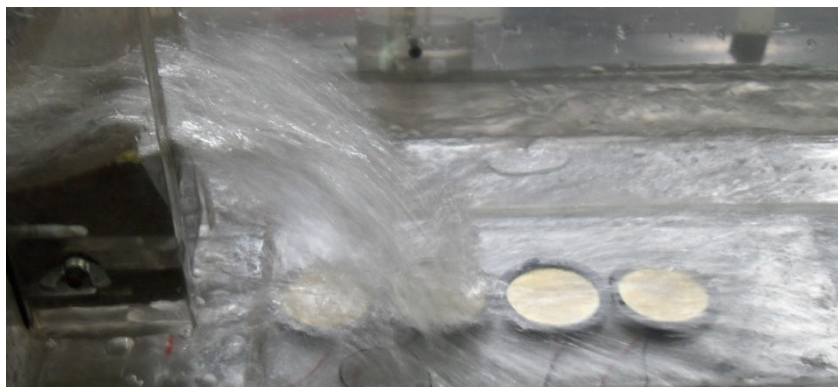


Figura 4.24. - Impacto do jacto na sonda piezo-eléctrica S2

Relativamente ao número de valores adquiridos pelo sistema de aquisição de dados e frequência utilizaram-se as mesmas considerações aplicadas para a medição de pressões médias ou seja, leitura de 500000 valores com uma frequência de 5000 Hz, que foi julgada adequada à forte variação do sinal a adquirir.

As sondas piezo-eléctricas utilizadas neste estudo são um equipamento que, medindo flutuações de pressão, não permitem obter valores médios das grandezas a medir, os quais seriam nulos, pelo que para caracterização do sinal se utilizará o seu valor R.M.S..

Como condições de ensaio foram utilizadas as mesmas relativas à medição de pressões médias para obtenção de uma total correspondência dos valores registados, tendo sido medidos flutuações de pressão em oito pontos quando considerados os caudais 0,51 l/s, 0,71 l/s e 0,85 l/s, e quatro pontos, para os restantes caudais de 0,99 l/s, 1,27 l/s, 1,77 l/s e 2,40 l/s, tal como ocorrido para as pressões médias.

Apresentam-se de seguida (Quadros 4.19. a 4.23.), e seguindo a metodologia usada para a apresentação dos resultados relativos a valores médios de pressão, os valores R.M.S. das pressões, medidos para o caudal 0,71 l/s para os diferentes valores de espessura de colchão de água de 1cm, 2cm, 3cm, 4cm e 5cm, nas diferentes tomadas de pressão, referenciadas como anteriormente descrito. Para além dos valores R.M.S. das flutuações de pressão são ainda indicados os valores máximos e mínimos (picos) registados durante os ensaios respectivos. Os valores correspondentes relativos aos restantes caudais testados são apresentados no anexo IV. Consideraram-se como positivas as pressões de compressão, sentido descendente e negativas as de sucção, sentido ascendente.

Quadro 4.19. – Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm

Colchão 1 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	13,35	12,86	10,57	4,85	1,85	0,86	0,50	0,24
Máximo (cm.c.a.)	306,87	146,77	99,83	212,96	198,08	24,17	7,64	27,72
Mínimo (cm.c.a.)	-85,33	-253,55	-188,55	-51,86	-90,70	-29,06	-31,33	-12,88

Quadro 4.20. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm

Colchão 2 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	12,52	11,59	9,11	4,64	1,44	0,74	0,25	0,16
Máximo (cm.c.a.)	446,56	99,99	135,31	294,15	196,73	20,68	10,60	13,20
Mínimo (cm.c.a.)	-84,52	-143,32	-181,03	-101,60	-89,63	-27,18	-23,53	-13,42

Quadro 4.21. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm

Colchão 3 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	9,81	7,69	5,75	4,01	1,20	0,57	0,19	0,13
Máximo (cm.c.a.)	138,71	63,69	93,92	149,78	30,18	6,70	4,69	7,55
Mínimo (cm.c.a.)	-52,55	-151,92	-131,57	-61,54	-14,68	-7,01	-6,33	-15,03

Quadro 4.22. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm

Colchão 4 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	7,54	3,85	3,38	2,64	1,10	0,46	0,16	0,10
Máximo (cm.c.a.)	70,48	35,47	41,24	51,65	17,29	4,82	4,42	4,06
Mínimo (cm.c.a.)	-28,91	-78,80	-118,94	-32,24	-4,74	-7,28	-4,45	-8,04

Quadro 4.23. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm

Colchão 5 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	3,11	2,53	1,98	1,78	0,90	0,37	0,14	0,07
Máximo (cm.c.a.)	60,81	25,52	14,90	50,30	12,45	-0,56	-3,64	8,36
Mínimo (cm.c.a.)	-19,24	-78,53	-56,86	-34,12	-9,57	-5,13	-7,67	0,02

Da análise dos quadros anteriores conclui-se que na sonda situada sobre a tomada de pressão S2, que é o ponto de impacto do jacto, foram captados picos de pressão negativa superiores aos da sonda S1 enquanto que os picos de pressão positiva na sonda S2 são inferiores aos registados na sonda S1. Tal facto não era esperado já que é na sonda S2 que se dá o impacto do jacto com o colchão de água sendo assim razoável que se esperasse a existência de um valor mais significativo de pressões positivas.

No que se refere ao valor R.M.S. da flutuação de pressão, os valores máximos são obtidos para a sonda S1 em todos os caudais testados e para todos os colchões de água correspondentes, exceptuando o caso do caudal de 0,51 l/s (anexo IV) onde esse valor máximo se verifica na sonda S2. Excluindo então este caso, poderá dizer-se que a tendência geral de comportamento deste fenómeno será de um aumento da flutuação de pressão a montante do local de impacto e de uma diminuição gradual da mesma flutuação para jusante até a influência do impacto do jacto praticamente não se fazer sentir. Como se referiu em 2.2.5.3., Lencastre ([34] e [44]) afirmou no seu estudo que o aumento da espessura do colchão de água a jusante iria actuar no sentido de atenuar as flutuações turbulentas de pressão. Tal afirmação é totalmente suportada pelos dados apresentados neste trabalho como se pode verificar nos quadros 4.19. a 4.23. e no anexo IV.

De notar igualmente a grandeza dos valores de flutuação registados em relação às pressões exercidas pelo colchão de água e em comparação com os valores registados por altura da medição das pressões médias.

Para uma melhor percepção física dos resultados obtidos neste subcapítulo e no subcapítulo 4.2.2. foram realizados esquemas onde são representadas as pressões médias no leito e as flutuações de pressão simultaneamente nos quais se pode confirmar a afirmação feita anteriormente. De seguida (Figuras 4.25. a 4.29.), são apresentados os desenhos referentes ao caudal de 0,71 l/s, encontrando-se os restantes no anexo V.

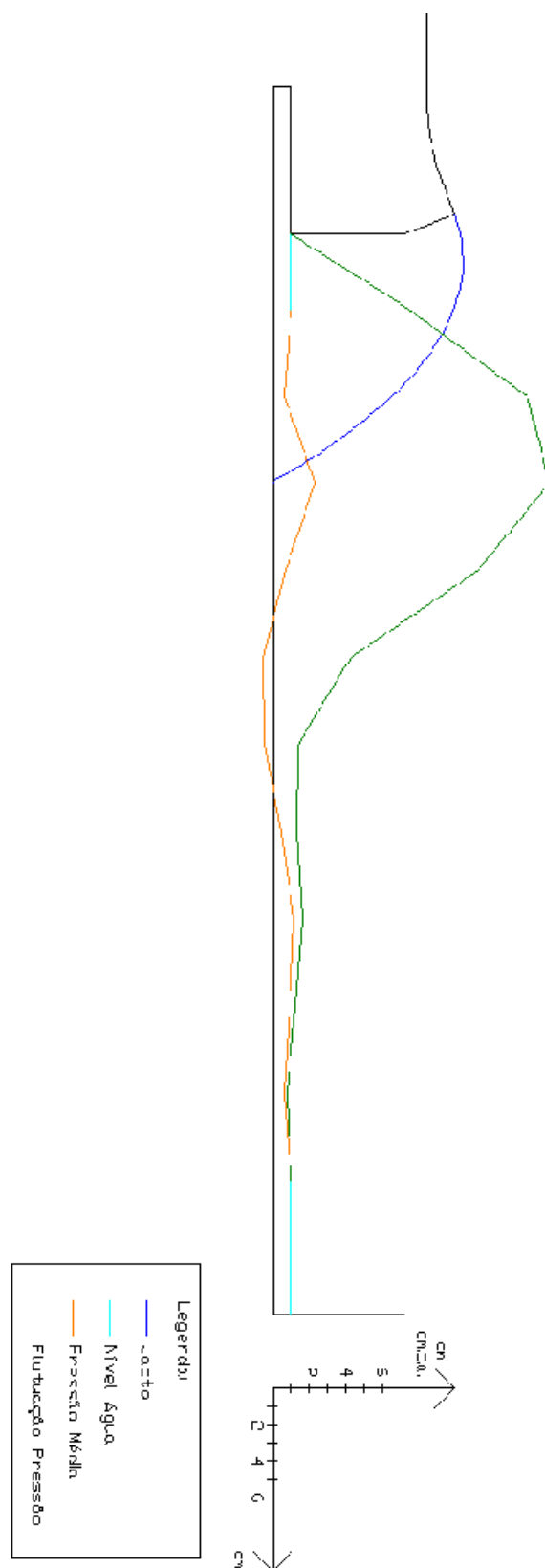


Figura 4.25. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm

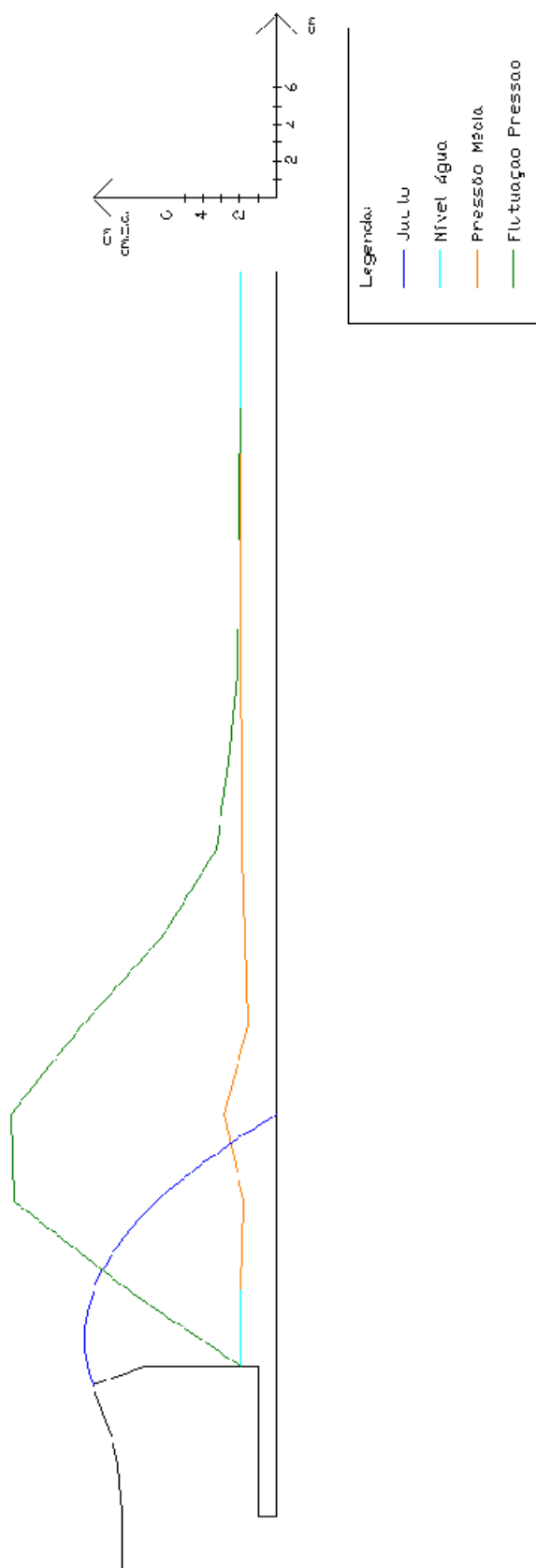


Figura 4.26. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm

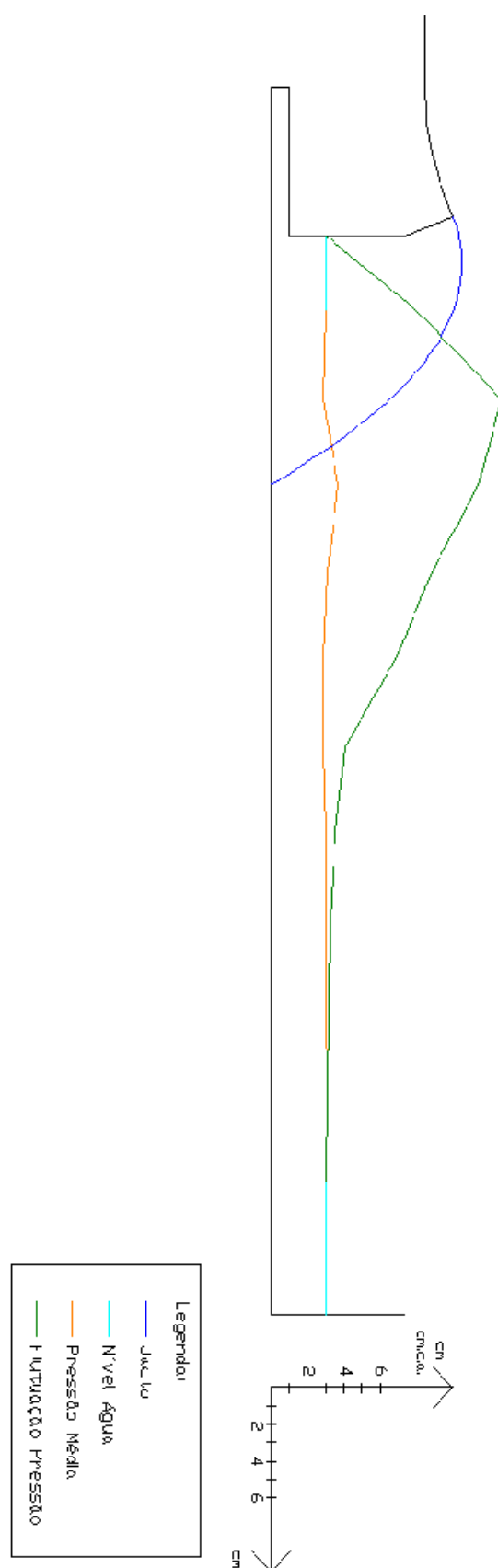


Figura 4.27. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm

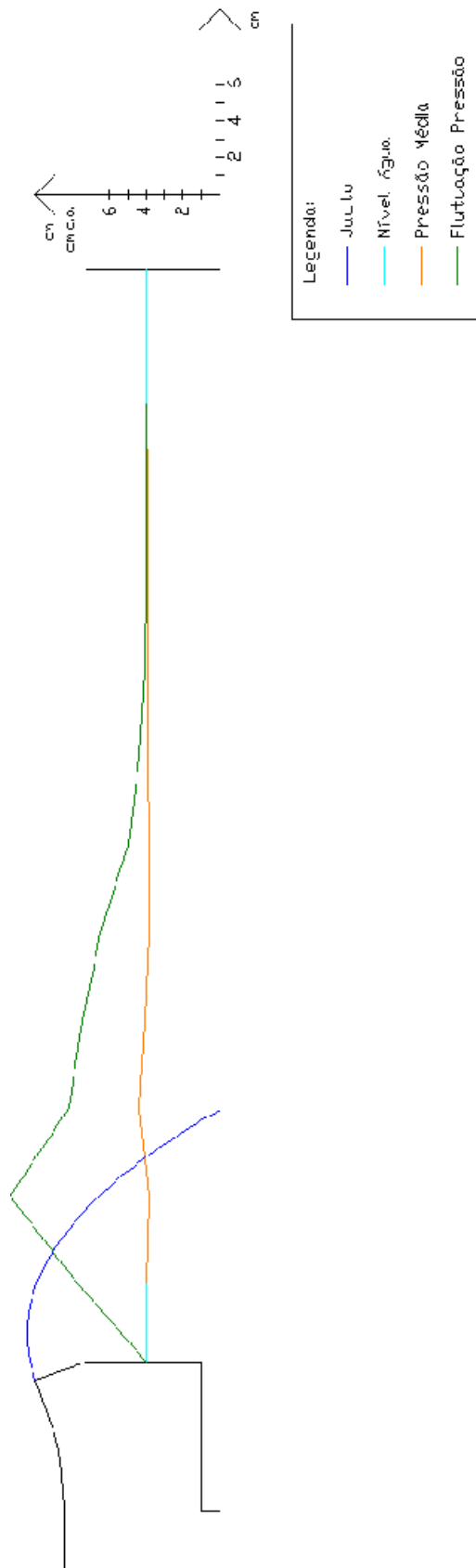


Figura 4.28. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm



Figura 4.29. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm

Adicionalmente apresentam-se ainda gráficos (Figuras 4.30 a 4.32.), para cada um dos caudais escoados, da razão entre valores de flutuações e os módulos das pressões médias para os diferentes colchões de água considerados.

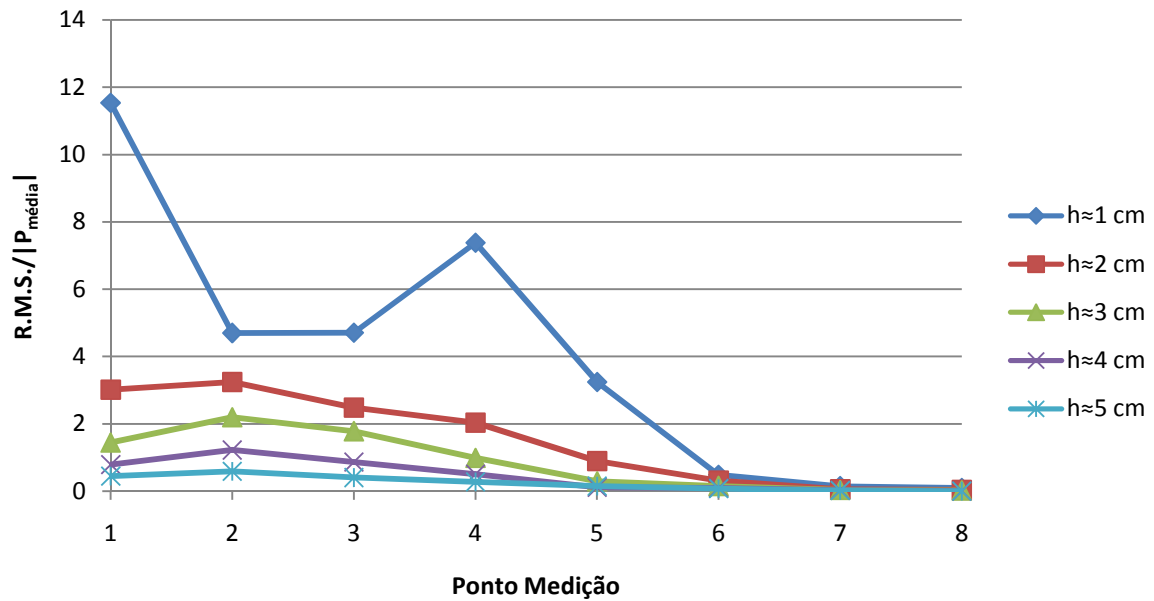


Figura 4.30. – Variação da razão $R.M.S./|P_{m\acute{e}dia}|$ de acordo com o ponto de medida, para $Q=0,51$ l/s e para os diferentes colchões de água

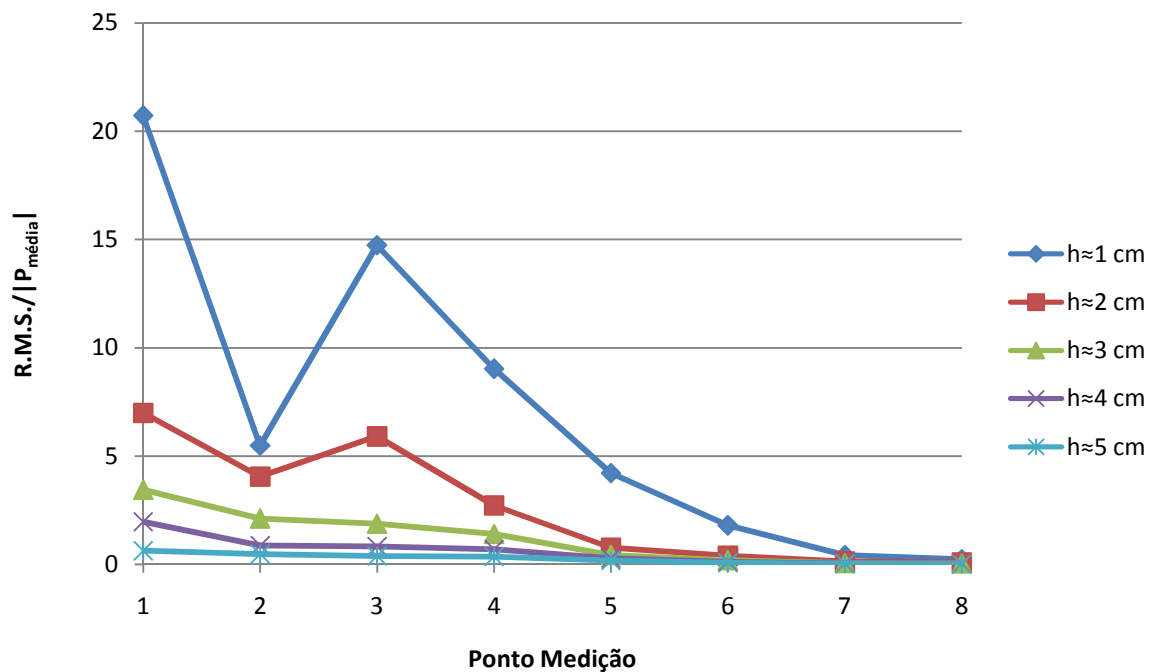


Figura 4.31. - Variação da razão $R.M.S./|P_{m\acute{e}dia}|$ de acordo com o ponto de medida, para $Q=0,71$ l/s e para os diferentes colchões de água

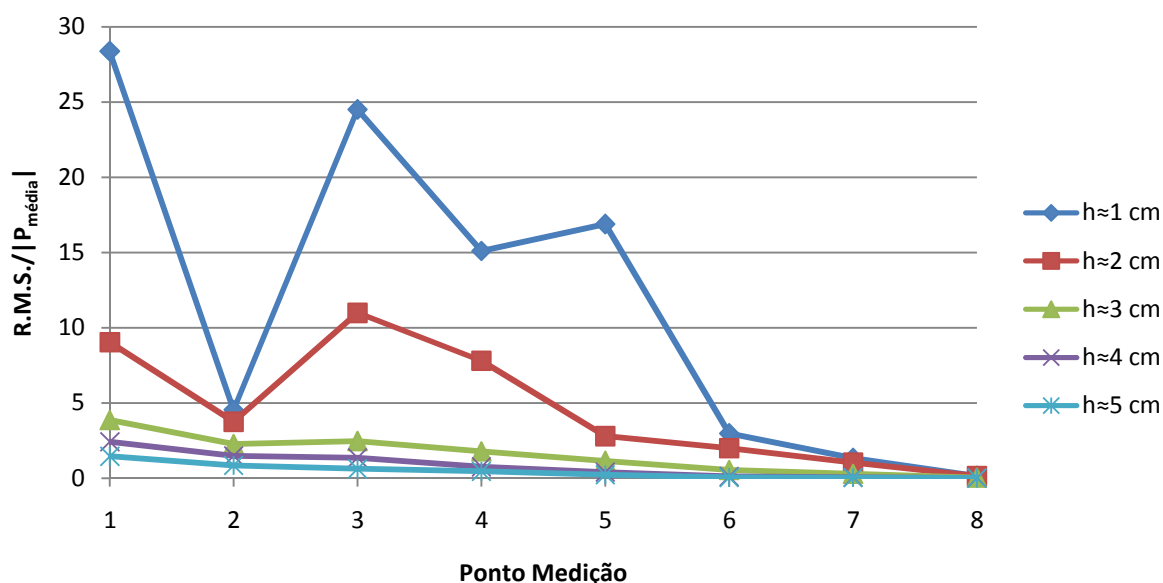


Figura 4.32. – Variação da razão $R.M.S./|P_{média}|$ de acordo com o ponto de medição, para $Q=0,85$ l/s e para os diferentes colchões de água

A análise dos gráficos apresentados permite concluir que os valores R.M.S. das flutuações de pressão são, para baixas espessuras de colchão de água, muito superiores aos valores da pressão média. O aumento da espessura do colchão de água reduz substancialmente o valor R.M.S., não se podendo concluir da existência de fortes pressões negativas nestas situações. Os valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ encontram-se no anexo V.

Foi igualmente analisado o sinal proveniente das sondas piezo-elétricas nas diferentes situações de escoamento, representando-se seguidamente na figura 4.33. um registo parcial (tempo do sinal apresentado – 5 segundos) do ensaio correspondente ao caudal de 0,71 l/s com uma espessura de colchão de água de 5 cm.

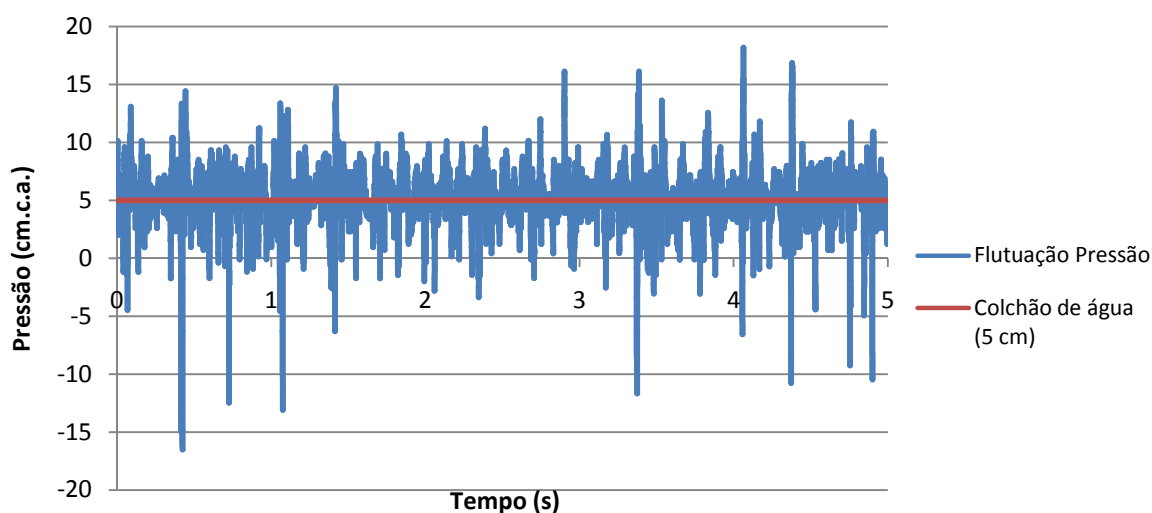


Figura 4.33. – Representação no tempo do sinal adquirido pela sonda piezo-elétrica S2 durante um intervalo de tempo de 5 segundos relativamente à altura do colchão de água

A análise da figura 4.33. permite concluir que durante grande parte do tempo se registam picos de pressão quer negativos quer positivos de valor sensivelmente superior à altura do colchão de água que, nestes casos, como já se referiu é aproximadamente igual à pressão média.

4.3. ENSAIOS EM FUNDO MÓVEL

Analizados os escoamentos com fundo fixo, procedeu-se à instalação de um fundo móvel no canal de restituição. Como referido o fundo amovível do canal de restituição foi rebaixado de forma a poder receber o material granular, de características já apresentadas, com 10 cm de espessura, colocado de tal forma que o seu nível superior ficasse na posição anteriormente ocupada pelo fundo fixo.

O objectivo destes ensaios era o registo das características das fossas de erosão ocorridas nas condições de escoamento até ao momento consideradas, sua análise tendo em conta os resultados de medições de pressão anteriormente realizadas e comparação das suas profundidades com resultados da aplicação de fórmulas de previsão de fossas de erosão, apresentadas na revisão bibliográfica do capítulo 2 deste trabalho.

Os caudais de teste considerados neste tipo de ensaios foram 0,51 l/s, 0,71 l/s e 0,85 l/s aliados aos valores das espessuras dos colchões de água já referidos. Os restantes caudais considerados nos ensaios em fundo fixo não foram testados, pelas razões enunciadas em 3.4.6., dado conduzirem a resultados experimentais de fossas de erosão que não traduziriam com o rigor necessário a realidade pretendida.

Garantindo o nivelamento do leito de material granular (Figura 4.34.), ajustada a comporta de jusante para a geração do colchão de água pretendido e acertado o caudal de teste, será possível dar início ao ensaio para, ao final de uma hora (período considerado suficiente para que se atingisse a fossa de erosão máxima e estabilização da mesma), ser medido, com recurso à estrutura apresentada na figura 3.23., o perfil de erosão correspondente, segundo o eixo longitudinal do descarregador e respectivo trampolim de saída.

Tendo em atenção os parâmetros representados na figura 3.24., registaram-se os perfis das fossas ocorridas em todas as situações de escoamento. No quadro 4.24. mostra-se o registo para a situação de caudal de 0,51 l/s aliado a um colchão de 5cm.



Figura 4.34. - Aspecto geral do leito

Quadro 4.24. - Levantamento do perfil de erosão para $Q=0,5$ l/s e $h \approx 5$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	7,70	0,70
f2	5,50	8,81	1,81
f3	7,50	9,46	2,46
f4	9,50	10,12	3,12
f5	11,50	10,46	3,46
f6	13,50	10,57	3,57
f7	15,50	10,26	3,26
f8	17,50	9,88	2,88
f9	19,50	9,16	2,16
f10	21,50	8,12	1,12
f11	23,50	7,02	0,02
f12	25,50	5,77	-1,23
f13	27,50	5,05	-1,95
f14	29,50	4,26	-2,74
f15	31,50	5,15	-1,85
f16	33,50	7,00	0,00

Executados todos os ensaios relativos a todas as condições de teste consideradas, os dados daí resultantes foram organizados em quadros semelhantes ao quadro 4.24. e que se encontram no anexo VI. Desses quadros foram retirados os valores das profundidades máximas de erosão em relação à superfície livre, D, e em relação ao nível do leito, f, para cada situação e compilada essa informação nos quadros seguintes (Quadros 4.25 a 4.27).

Quadro 4.25.- Resumo das profundidades máximas de erosão verificadas para $Q=0,51$ l/s

h (m)	H_0 (m)	H_1 (m)	H_{modelo} (m)	f_{medida} (m)	D_{medido} (m)
0,01	0,0206	0,09	0,1106	0,053	0,063
0,02	0,0206	0,08	0,1006	0,049	0,069
0,03	0,0206	0,07	0,0906	0,0445	0,0745
0,04	0,0206	0,06	0,0806	0,041	0,081
0,05	0,0206	0,05	0,0706	0,0357	0,0857

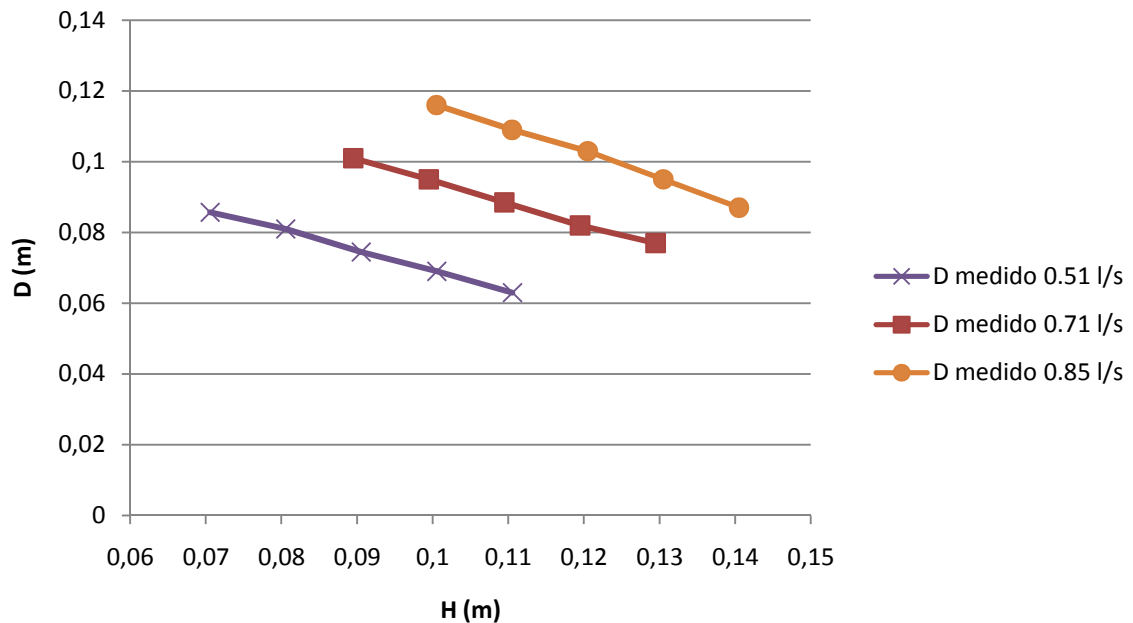
Quadro 4.26. - Resumo das profundidades máximas de erosão verificadas para $Q=0,71$ l/s

h (m)	H_0 (m)	H_1 (m)	H_{modelo} (m)	f_{medida} (m)	D_{medido} (m)
0,01	0,0395	0,09	0,1295	0,067	0,077
0,02	0,0395	0,08	0,1195	0,062	0,082
0,03	0,0395	0,07	0,1095	0,0585	0,0885
0,04	0,0395	0,06	0,0995	0,055	0,095
0,05	0,0395	0,05	0,0895	0,051	0,101

Quadro 4.27. - Resumo das profundidades máximas de erosão verificadas para $Q=0,85$ l/s

h (m)	H_0 (m)	H_1 (m)	H_{modelo} (m)	f_{medida} (m)	D_{medido} (m)
0,01	0,0505	0,09	0,1405	0,077	0,087
0,02	0,0505	0,08	0,1305	0,075	0,095
0,03	0,0505	0,07	0,1205	0,073	0,103
0,04	0,0505	0,06	0,1105	0,069	0,109
0,05	0,0505	0,05	0,1005	0,066	0,116

Foram também representados os valores de D e f em função do valor da queda respectiva, como se pode ver nas figuras 4.35. e 4.36..

Figura 4.35. - Representação gráfica dos valores D obtidos experimentalmente

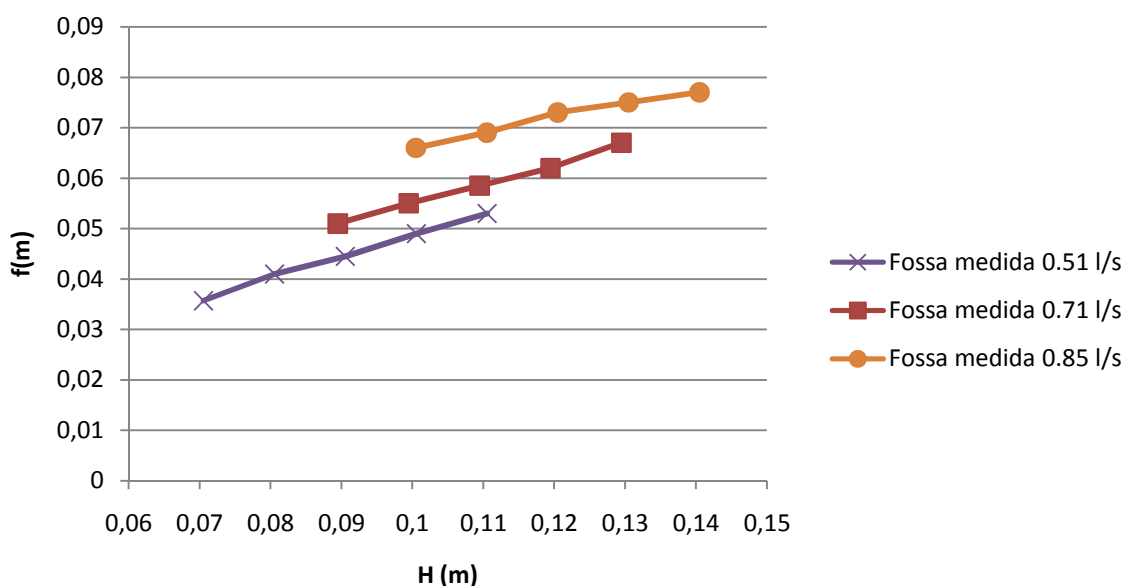


Figura 4.36. - Representação gráfica dos valores f obtidos experimentalmente

Pela observação da figura 4.36. é possível verificar que os valores da fossa obtidos experimentalmente, quando transformados para o valor correspondente em protótipo, tomam valores significativos (valor máximo em protótipo de 3,08 m).

Durante os ensaios (Figura 4.37.) verificou-se que o material mais grosso do leito do rio encontra-se na zona central da fossa para todos os caudais e espessuras de colchão testados. Pode-se também afirmar que, nos testes de um determinado caudal, a altura da barra criada iria decrescer gradualmente com a diminuição da altura do colchão de água do leito. A diminuição da altura da barra por diminuição da altura do colchão de água implica a deposição do material, que teoricamente iria constituir a barra, mais a jusante o que provoca um aumento da extensão da barra (maior área de influência).



Figura 4.37. - Aspecto final do leito após ensaio onde a altura do colchão de água foi um factor condicionante da altura da barra

Para os valores retirados destes ensaios foram também executados esquemas correspondentes a cada situação sendo de seguida apresentados os relativos ao caudal de 0,71 l/s (Figuras 4.38 a 4.42.) encontrando-se os restantes no anexo VI.

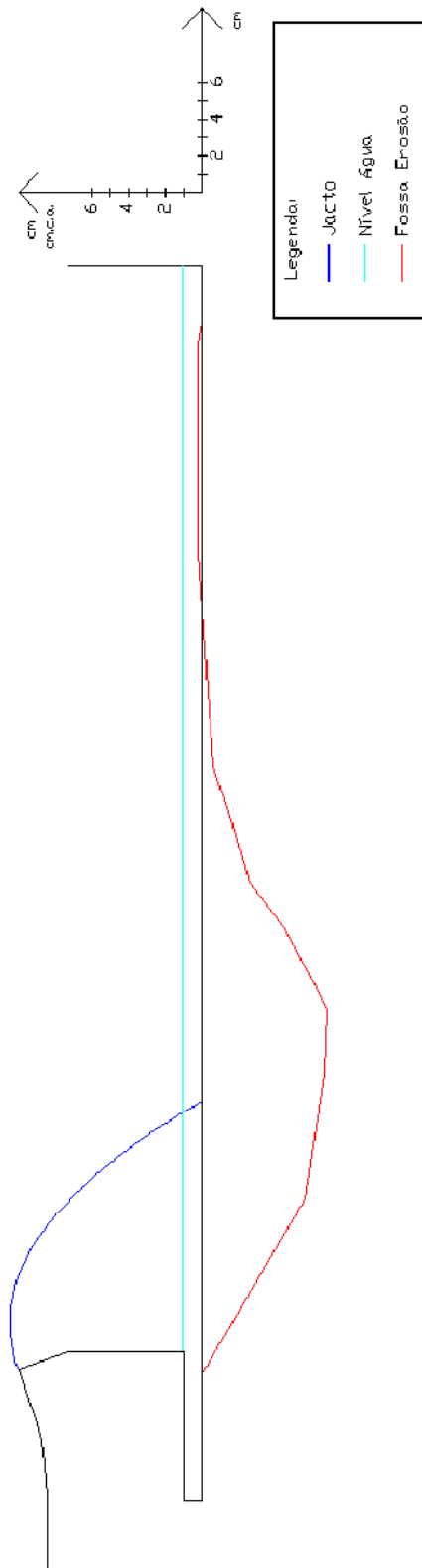


Figura 4.38. – Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm



Figura 4.39. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm

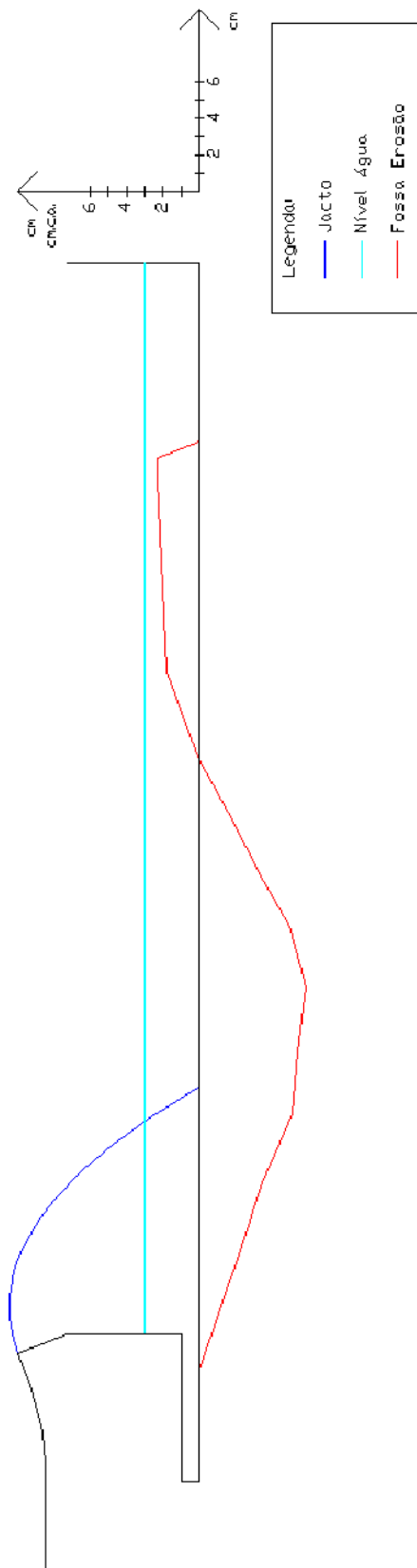


Figura 4.40. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm

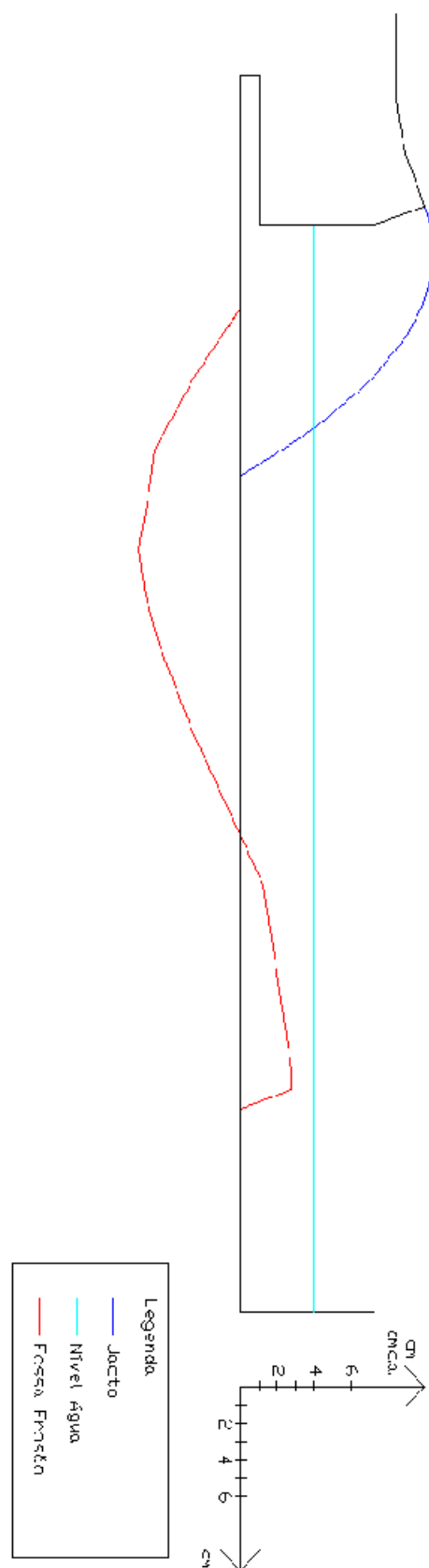


Figura 4.41. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm

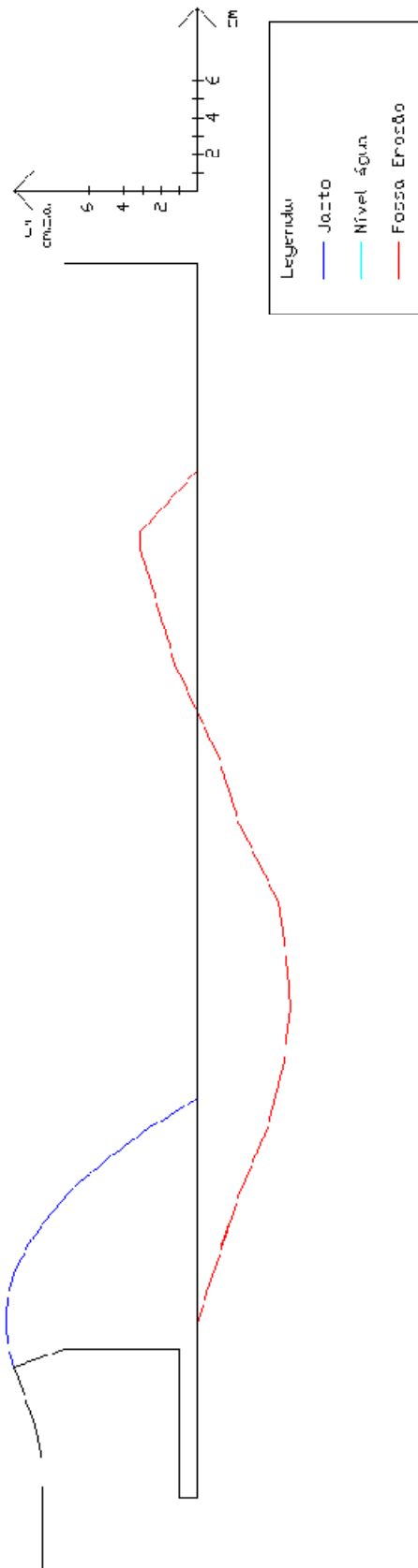


Figura 4.42. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm

Depois de realizado o trabalho experimental necessário para a recolha destes dados, foram comparados os valores das profundidades máximas das fossas de erosão com os valores teóricos calculados pelas várias expressões consideradas neste trabalho e enumeradas no capítulo 2. Para aplicação dessas fórmulas é fundamental conhecer alguns parâmetros de cálculo para aplicação das mesmas. Tais parâmetros de cálculo são identificados nos quadros 4.28. a 4.32.

Quadro 4.28 - Valores da queda para $Q=0,51$ l/s

h (m)	$h_{\text{protótipo}}$ (m)	Q=0,51 l/s			
		H_0 (m)	H_1 (m)	H_{modelo} (m)	$H_{\text{protótipo}}$ (m)
0,01	0,4	0,0206	0,09	0,1106	4,4222
0,02	0,8	0,0206	0,08	0,1006	4,0222
0,03	1,2	0,0206	0,07	0,0906	3,6222
0,04	1,6	0,0206	0,06	0,0806	3,2222
0,05	2	0,0206	0,05	0,0706	2,8222

Quadro 4.29. - Valores da queda para $Q=0,71$ l/s

h (m)	$h_{\text{protótipo}}$ (m)	Q=0,71 l/s			
		H_0 (m)	H_1 (m)	H_{modelo} (m)	$H_{\text{protótipo}}$ (m)
0,01	0,4	0,0395	0,09	0,1295	5,1793
0,02	0,8	0,0395	0,08	0,1195	4,7793
0,03	1,2	0,0395	0,07	0,1095	4,3793
0,04	1,6	0,0395	0,06	0,0995	3,9793
0,05	2	0,0395	0,05	0,0895	3,5793

Quadro 4.30. - Valores da queda para $Q=0,85$ l/s

h (m)	$h_{\text{protótipo}}$ (m)	Q=0,85 l/s			
		H_0 (m)	H_1 (m)	H_{modelo} (m)	$H_{\text{protótipo}}$ (m)
0,01	0,4	0,0505	0,09	0,1405	5,6200
0,02	0,8	0,0505	0,08	0,1305	5,2200
0,03	1,2	0,0505	0,07	0,1205	4,8200
0,04	1,6	0,0505	0,06	0,1105	4,4200
0,05	2	0,0505	0,05	0,1005	4,0200

Quadro 4.31. - Valores dos caudais utilizados

Q (l/s)	Q _{protótipo} (m ³ /s)	q _{modelo} (m ² /s)	q _{protótipo} (m ² /s)
0,51	5,1458	0,0102	2,5729
0,71	7,1427	0,0141	3,5713
0,85	8,5668	0,0169	4,2834

Quadro 4.32. - Diâmetros característicos do material granular utilizado nos ensaios

d _{m-modelo} (m)	d _{m-protótipo} (m)	d _{85-modelo} (m)	d _{85-protótipo} (m)	d _{90-modelo} (m)	d _{90-protótipo} (m)
0,001207	0,04828	0,00244	0,0976	0,00297	0,1188

Neste momento, foi possível aplicar todas as fórmulas consideradas neste estudo sendo, por vezes, necessário calcular alguns parâmetros auxiliares próprios da fórmula de cada autor mas que têm como base os parâmetros referidos nos quadros anteriores. O cálculo detalhado da profundidade máxima de erosão para a expressão de cada autor encontra-se no anexo VII. No entanto, apresentam-se neste subcapítulo três quadros-resumo onde são referidos os valores da profundidade máxima da fossa resultante do processo erosivo obtidos por aplicação das fórmulas teóricas e os valores medidos em modelo, neste estudo.

Realizadas as previsões será feita uma análise crítica das mesmas identificando quais as expressões teóricas que mais se aproximaram do resultado experimental e quais apresentaram os valores mais discrepantes. Esta análise será suportada pelas condições de aplicabilidade, quando conhecidas, das diferentes fórmulas o que poderá justificar a aproximação, ou não, das estimativas realizadas à realidade do modelo.

Relativamente às melhores aproximações serão apresentados os gráficos de comparação dos parâmetros D e f obtidas pelas expressões com os mesmos parâmetros obtidos experimentalmente (os restantes encontrar-se-ão no anexo VII). Deste modo, será mais fácil compreender a evolução simultânea da fossa prevista pelas expressões e pela prática para as mesmas condições de teste.

Nos quadros seguintes (Quadros 4.33. a 4.35.) são apresentados, para cada caudal testado em modelo, os valores das profundidades máximas previstas pelos diferentes autores bem como os resultados obtidos nos ensaios deste estudo.

Quadro 4.33. - Resumo das fossas obtidas para $Q = 0,51$ l/s (em modelo)

Grupo	Autor	Q=0,51 l/s				
		h=1 cm	h=2 cm	h=3 cm	h=4 cm	h=5 cm
Grupo I	Chian Min Wu	5,77	4,62	3,46	2,29	1,10
	Damle (A)	4,50	3,24	1,98	0,69	-0,61
	Eggenberger	30,29	27,84	25,32	22,71	20,00
	Franke	31,46	28,96	26,38	23,71	20,94
	Hartung	22,04	20,27	18,45	16,56	14,60
	INCYTH	7,22	6,02	4,82	3,59	2,34
	Machado (A)	8,84	7,55	6,25	4,91	3,55
	Martins (B)	6,67	5,60	4,52	3,43	2,33
	Patrashev	5,83	4,67	3,50	2,31	1,10
	Schoktlisch	4,94	3,83	2,71	1,58	0,43
	Taraimovich	3,32	2,22	1,11	-0,01	-1,14
	Veronese (A)	3,20	2,11	1,01	-0,09	-1,21
	Veronese (B)	10,06	8,82	7,57	6,30	4,99
Grupo II	Jaeger	6,49	7,26	7,39	7,19	6,77
	Martins (A)	1,06	0,02	-1,02	-2,06	-3,11
	Mason & Arumugam (A)	6,41	6,19	5,65	4,98	4,23
	Mason & Arumugam (B)	7,00	6,82	6,32	5,66	4,92
	Rubinstein	24,52	20,26	18,46	17,56	17,15
	Ghodsian	0,18	-1,13	-2,28	-3,38	-4,45
Grupo III	Davis-Sorensen	6,37	4,70	3,04	1,37	-0,30
Grupo IV	Mikhalev	11,88	6,75	3,83	1,59	-0,32
	Mirtskhulava (A)	12,61	11,06	9,50	7,91	6,17
	Mirtskhulava (B)	6,26	5,34	4,44	3,54	2,56
	Yildiz & Uzucek	3,45	2,66	1,77	0,85	0,09
Ensaio	Valor medido	5,30	4,90	4,45	4,10	3,57

Quadro 4.34. - Resumo das fossas obtidas para $Q = 0,71$ l/s (em modelo)

Grupo	Autor	Q=0,71 l/s				
		h=1 cm	h=2 cm	h=3 cm	h=4 cm	h=5 cm
Grupo I	Chian Min Wu	7,31	6,15	4,99	3,81	2,62
	Damle (A)	6,01	4,73	3,45	2,14	0,83
	Eggenberger	40,23	37,61	34,91	32,14	29,27
	Franke	42,77	40,04	37,24	34,36	31,38
	Hartung	29,09	27,23	25,32	23,36	21,34
	INCYTH	9,07	7,87	6,66	5,43	4,18
	Machado (A)	11,19	9,88	8,56	7,22	5,85
	Martins (B)	8,49	7,41	6,33	5,24	4,14
	Patrashev	7,37	6,20	5,03	3,84	2,63
	Schoktlisch	6,39	5,27	4,15	3,01	1,87
	Taraimovich	4,60	3,49	2,37	1,24	0,11
	Veronese (A)	4,19	3,10	2,00	0,89	-0,22
	Veronese (B)	12,68	11,43	10,17	8,89	7,58
Grupo II	Jaeger	7,65	8,68	8,95	8,85	8,47
	Martins (A)	0,32	-0,68	-1,69	-2,70	-3,71
	Mason & Arumugam (A)	8,10	8,05	7,64	7,05	6,37
	Mason & Arumugam (B)	8,79	8,80	8,42	7,86	7,19
	Rubinstein	24,52	20,26	18,46	17,56	17,15
	Ghodsian	0,46	-0,92	-2,10	-3,22	-4,31
Grupo III	Davis-Sorensen	7,63	5,97	4,30	2,63	0,97
Grupo IV	Mikhalev	17,88	10,93	7,25	4,59	2,39
	Mirtskhulava (A)	17,69	16,09	14,40	12,67	10,83
	Mirtskhulava (B)	12,52	11,53	10,45	9,35	8,18
	Yildiz & Uzucek	6,15	5,25	4,45	3,61	2,80
Ensaio	Valor medido	6,70	6,20	5,85	5,50	5,10

Quadro 4.35. - Resumo das fossas obtidas para $Q = 0,85$ l/s (em modelo)

Grupo	Autor	Q=0,85 l/s				
		h=1 cm	h=2 cm	h=3 cm	h=4 cm	h=5 cm
Grupo I	Chian Min Wu	8,29	7,13	5,96	4,78	3,59
	Damle (A)	7,00	5,71	4,41	3,09	1,76
	Eggenberger	46,90	44,16	41,36	38,48	35,51
	Franke	50,50	47,63	44,69	41,67	38,55
	Hartung	33,81	31,90	29,94	27,93	25,85
	INCYTH	10,26	9,05	7,83	6,60	5,35
	Machado (A)	12,70	11,38	10,05	8,70	7,33
	Martins (B)	9,67	8,59	7,51	6,41	5,32
	Patrashev	8,36	7,18	6,00	4,81	3,60
	Schoktlisch	7,33	6,21	5,08	3,94	2,79
	Taraimovich	5,46	4,34	3,21	2,08	0,94
	Veronese (A)	4,83	3,74	2,64	1,53	0,41
	Veronese (B)	14,37	13,11	11,84	10,56	9,25
Grupo II	Jaeger	9,03	10,43	10,99	11,12	10,97
	Martins (A)	1,17	0,14	-0,89	-1,93	-2,97
	Mason & Arumugam (A)	9,19	9,26	8,92	8,39	7,75
	Mason & Arumugam (B)	9,93	10,08	9,77	9,27	8,65
	Rubinstein	31,07	25,59	23,24	22,01	21,38
	Ghodsian	0,18	-1,13	-2,28	-3,38	-4,45
Grupo III	Davis-Sorensen	8,37	6,70	5,03	3,37	1,70
Grupo IV	Mikhalev	22,20	13,99	9,74	6,79	4,40
	Mirtskhulava (A)	21,28	19,57	17,84	15,95	13,99
	Mirtskhulava (B)	15,38	14,26	13,13	11,85	10,53
	Yildiz & Uzucek	7,69	6,88	6,03	5,28	4,51
Ensaio	Valor medido	7,70	7,50	7,30	6,90	6,60

Pela análise dos quadros anteriores é possível afirmar o seguinte:

- a) As fórmulas de Eggenberger, Franke e Hartung conduzem, como já o havia afirmado Martins [25], a resultados aberrantes;
- b) As discrepâncias apresentadas entre os valores calculados pelas fórmulas de Damle, Patrashev, Schoktlisch, Veronese (A) e (B) e, por fim, de Taraimovich e os valores obtidos experimentalmente poderão ser explicadas pela não compatibilidade destas fórmulas com a semelhança de Froude que, para ser garantida, deverá obrigar a que se cumpra a condição traduzida pela expressão (2.30.);
- c) A admissão da hipótese de que a profundidade da escavação é independente da dimensão do material que constitui o leito, conduz a resultados divergentes. Para a fórmula de Martins (B) e INCYTH obtêm-se previsões por defeito para os maiores colchões de água e por excesso para os colchões de menor espessura. No entanto, a expressão de Chian Min Wu fornece previsões que estão aquém da fossa obtida experimentalmente para todas as alturas de colchão de água exceptuando para o colchão de 1 cm de altura;
- d) A expressão de Machado (A) conduzirá, na esmagadora maioria dos casos, a previsões pelo lado da segurança, ou seja, irá sobrestimar a profundidade máxima da fossa obtida experimentalmente;
- e) Relativamente às expressões do grupo II é de notar que as fórmulas de Martins (A) e Ghodsian fornecem previsões com valores negativos concluindo então que aplicação destas fórmulas não será viável. De facto, a expressão de Martins (A) foi obtida experimentalmente para blocos paralelepípedicos de dimensões consideráveis, o que contrasta bastante com o material granular disponível para os ensaios conduzidos no âmbito desta dissertação, podendo assim explicar as diferenças verificadas;
- f) Aplicada a fórmula de Jaeger verifica-se que os valores de profundidade máxima de erosão obtidos têm tendência crescente com o aumento do colchão de água, tal afigura-se incoerente já que fará pouco sentido que exista um aumento da profundidade máxima da fossa quando aumenta a altura do colchão de água que serve como protecção ao leito;
- g) À semelhança das expressões referidas em a), também a expressão de Rubinstein dá origem a previsões extremamente discrepantes da realidade em modelo;
- h) Embora dêem origem a previsões de valores superiores à realidade, ambas as expressões de Mason & Arumugam traduzem, de forma bastante aproximada, a tendência de evolução da profundidade máxima da fossa de erosão para um caudal específico fazendo variar a altura do colchão de água;
- i) Como seria expectável as expressões do grupo III, pela sua visão simplista do fenómeno de erosão do leito do rio, origina previsões que se afastam muito dos valores encontrados neste estudo;
- j) As expressões do grupo IV, composto por autores da escola Russa como Mikhalev e Mirtskhulava dão origem a previsões exageradas. No entanto, para o menor caudal descarregado (0,51 l/s) a fórmula de Mirtskhulava (B) indica valores teóricos próximos da realidade;
- k) Yildiz & Uzucek com a sua modificação da fórmula de Veronese conjecturam valores mais próximos da realidade, verificada em modelo, para os maiores caudais descarregados e analisados neste estudo.

Uma questão, que se reveste de grande importância prende-se com as condições em que as fórmulas se desenvolveram. Qual o tipo de material utilizado no estudo, qual a dimensão característica utilizada, qual o peso volumico do material usado para a criação do leito e quais os caudais testados serão perguntas válidas que se colocarão por altura da aplicação da fórmula a um caso concreto. Na maioria

das expressões não foi possível obter resposta para estas questões pelo que as previsões realizadas se revestem de um considerável grau de incerteza. De notar ainda que grande parte dos autores, em que se conheciam as condições de teste, refere que as expressões criadas foram elaboradas tendo por base ensaios em que o peso específico dos materiais se situava entre 20 a 26 kN/m³.

Analisando em conjunto os quadros 4.33. a 4.35. e as afirmações realizadas anteriormente é possível afirmar que as expressões que melhor se ajustam aos resultados experimentais são as expressões de Martins (B) e de Mason & Arumugam (A) e (B), mesmo fixando o diâmetro característico do material em 0,25 m.

Para uma melhor percepção da evolução dos valores obtidos pelas expressões já referidas anteriormente na pesquisa bibliográfica da profundidade máxima da escavação medida a partir da superfície livre a jusante, D , e da profundidade de erosão relativamente ao leito inicial, f , relativamente aos obtidos experimentalmente apresentam-se de seguida os gráficos que traduzem esta evolução para as expressões que melhor traduzem o caso em estudo.

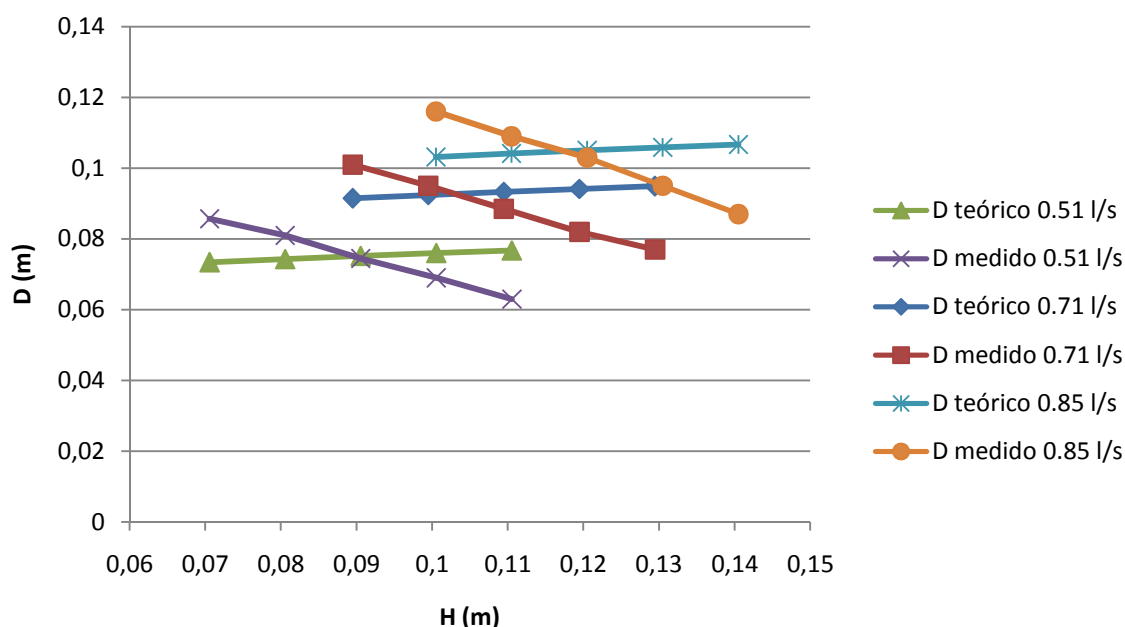


Figura 4.43. – Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Martins (B)

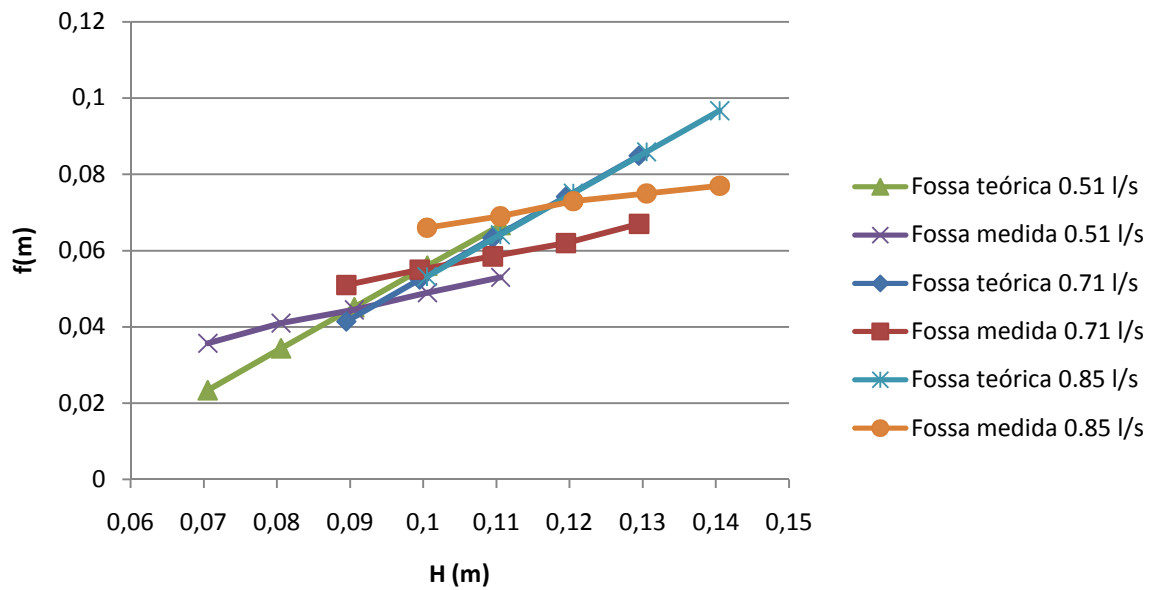


Figura 4.44. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Martins (B)

No gráfico da figura 4.35. verifica-se que a evolução dos valores obtidos experimentalmente do parâmetro D será inversa da evolução dos valores teóricos do mesmo parâmetro. O mesmo acontecerá para todas as expressões apresentadas no capítulo 2 (visível nos gráficos do Anexo VII).

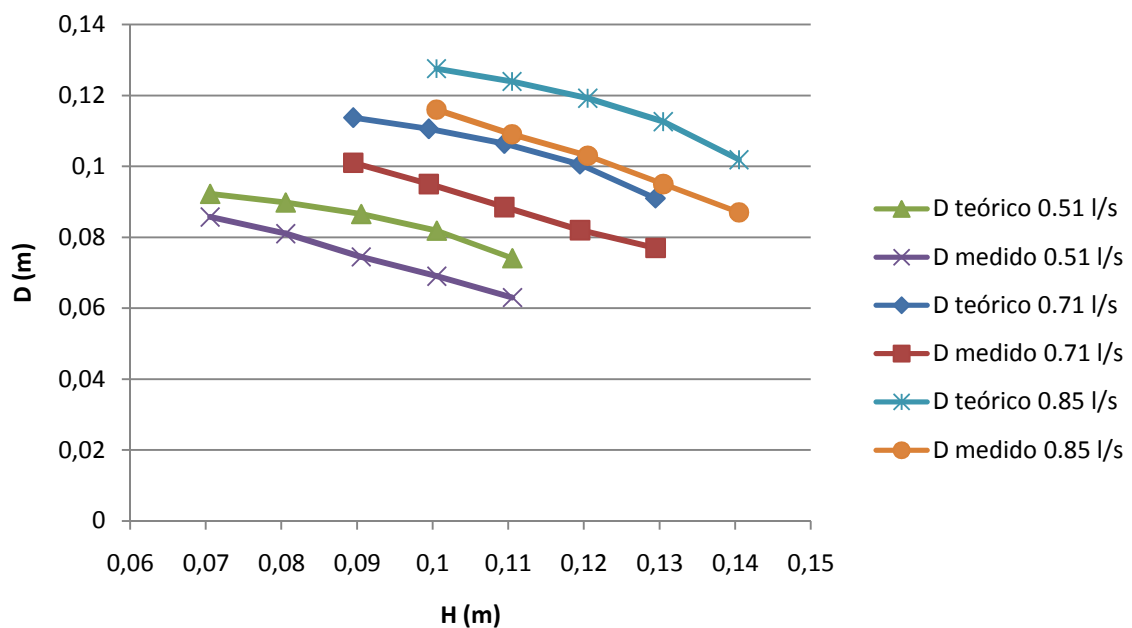


Figura 4.45. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A)

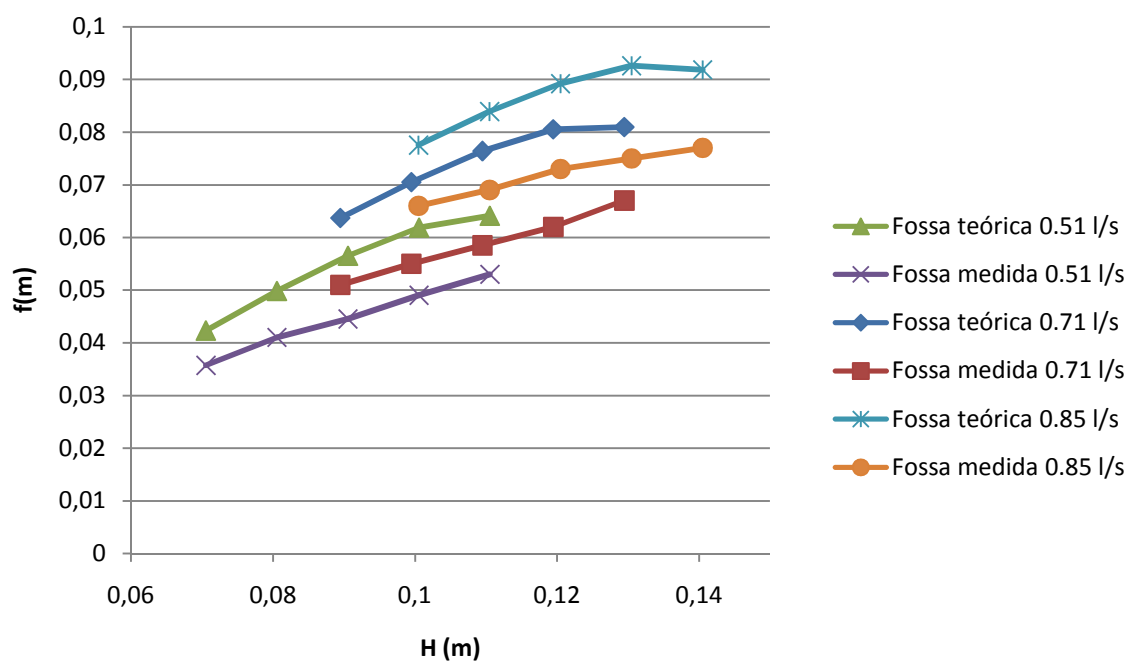


Figura 4.46. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A)

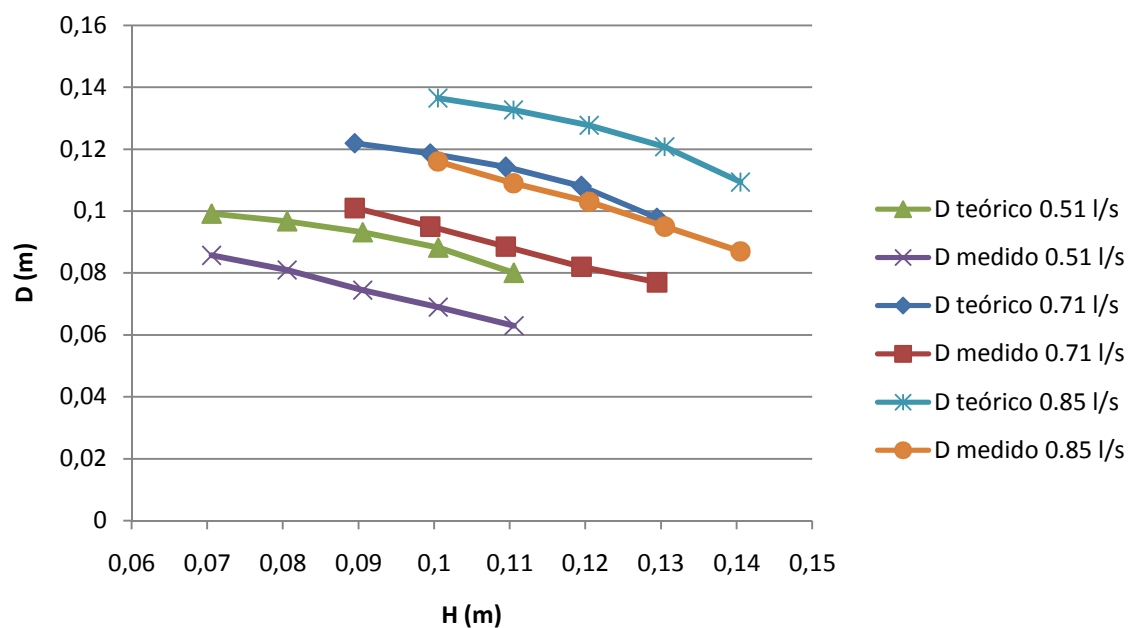


Figura 4.47. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B)

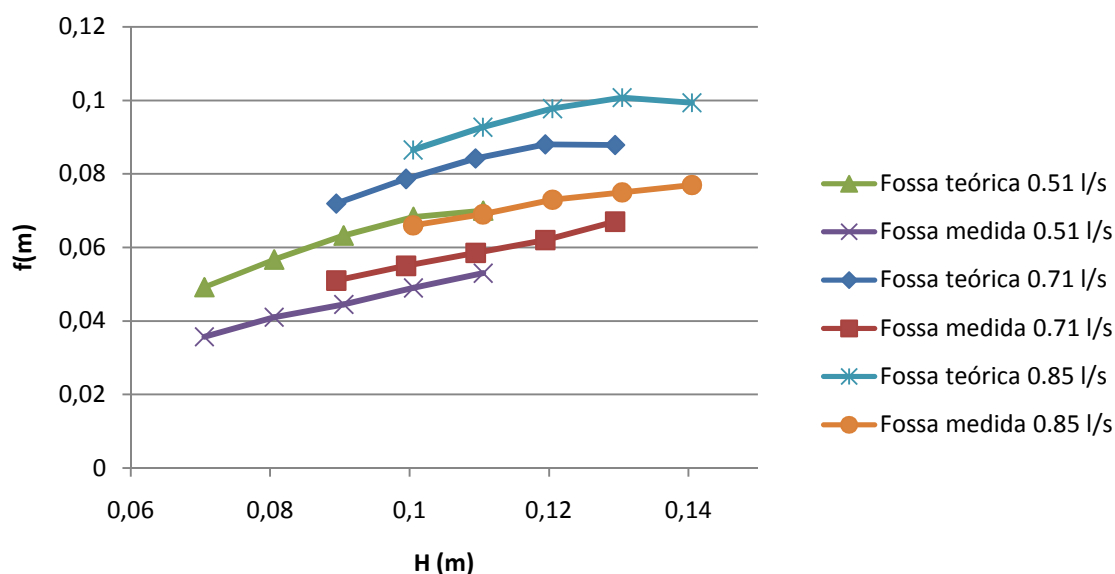


Figura 4.48. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B)

As duas fórmulas de Mason & Arumugam, pelo contrário, seguem a mesma tendência verificada em modelo (Figura 4.45. e 4.47.).

Relativamente às dimensões previstas das fossas deve-se dizer que a expressão de Martins (B) conduz, para cada caudal, a uma curva de evolução de profundidade de fossas que irá intersectar a curva de profundidade de fossas obtida através de ensaios em modelo. Já nas expressões de Mason & Arumugam as referidas curvas de evolução teórica serão tendencialmente paralelas às curvas experimentais.

Verificou-se que a alteração do parâmetro K, nas expressões de Mason & Arumugam, conduziria a um melhor ajuste aos valores medidos experimentalmente. O parâmetro K como foi referido em 2.2.5.3., poderá traduzir, de forma simples, algumas considerações relativas, por exemplo, à densidade relativa do material do leito. Tendo em atenção que o valor do peso específico do material utilizado era de 16,5 kN/m³ foi ajustado esse parâmetro.

Alterando, então, o parâmetro K da expressão Mason & Arumugam (A) de 3,27 para 2,77 obtém-se o cenário apresentado no quadro 4.36 e nas figuras 4.49 e 4.50.

Quadro 4.36. – Valores de $D_{\text{expressão}}$ e de $f_{\text{expressão}}$ segundo a expressão de Mason & Arumugam (A) com valor de K proposto

h (m)	Q= 0.51 l/s		Q= 0.71 l/s		Q= 0.85 l/s	
	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)
0,01	0,0628	0,0528	0,0770	0,0670	0,0863	0,0763
0,02	0,0693	0,0493	0,0851	0,0651	0,0954	0,0754
0,03	0,0733	0,0433	0,0901	0,0601	0,1010	0,0710
0,04	0,0761	0,0361	0,0936	0,0536	0,1050	0,0650
0,05	0,0782	0,0282	0,0963	0,0463	0,1080	0,0580

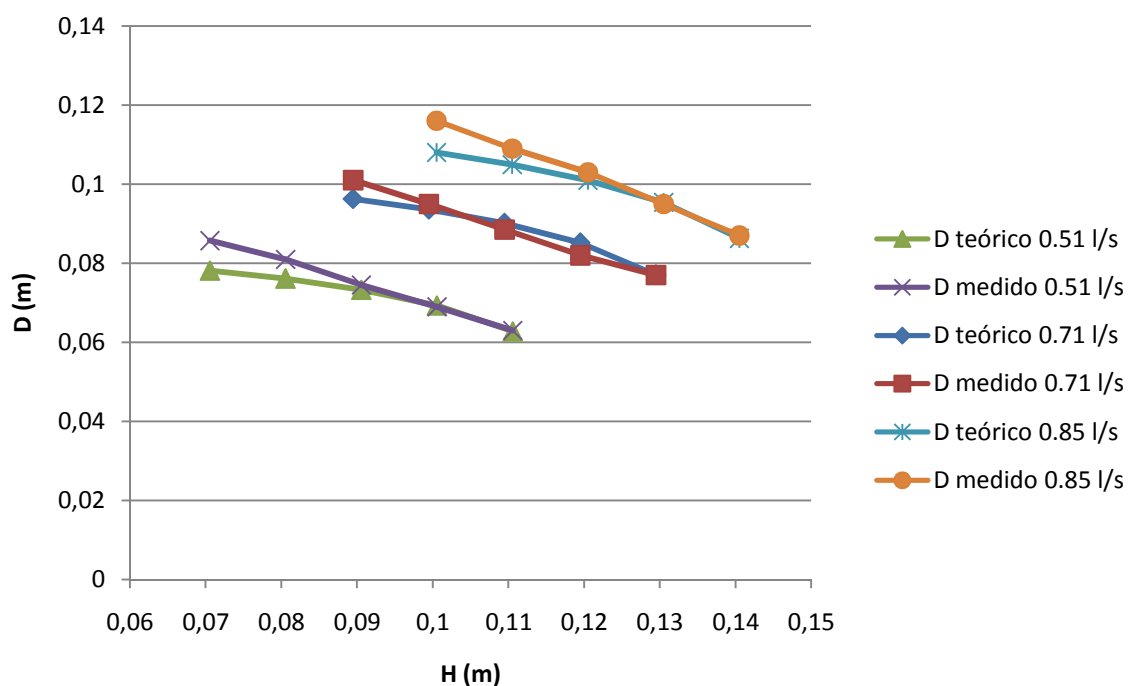


Figura 4.49. – Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A) com valor de K proposto

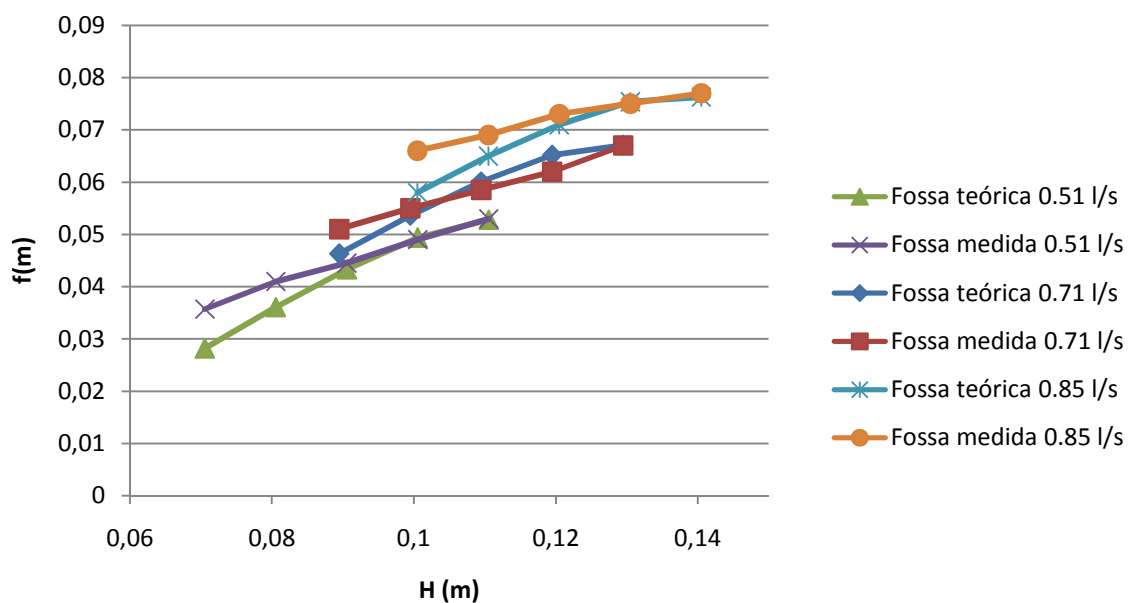


Figura 4.50. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (A) com valor de K proposto

Embora se tenham obtido melhorias extremamente significativas no ajuste das curvas teóricas às experimentais, para as alturas de colchão de água superiores (valores de queda mais reduzidos) a previsão teórica tende a afastar-se um pouco dos valores reais medidos em modelo físico. Desta forma, decidiu-se alterar o parâmetro K em função da altura do colchão de água existente no leito. Para tal

recorreu-se à expressão de Mason & Arumugam (A) sendo K calculado através da expressão (2.16.) da expressão Mason & Arumugam (B) obtendo os resultados indicados nas figuras 4.51 e 4.52., expostos também no anexo VII. No quadro 4.37 são apresentados os valores do parâmetro K utilizados para cada valor de queda.

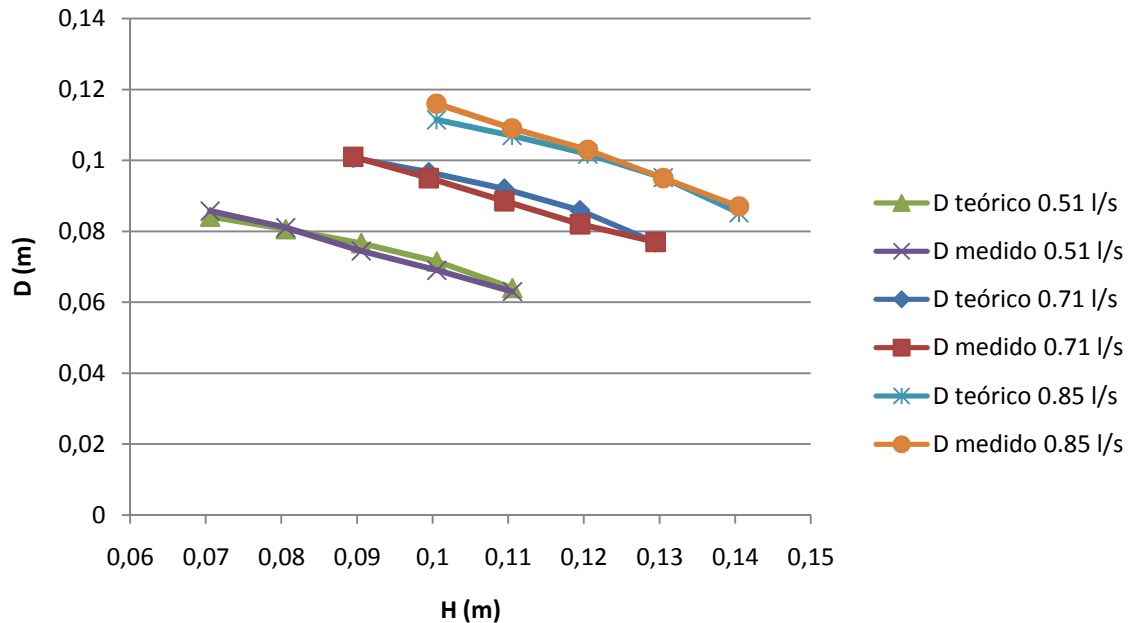


Figura 4.51. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B) com K calculado através da expressão (2.16.)

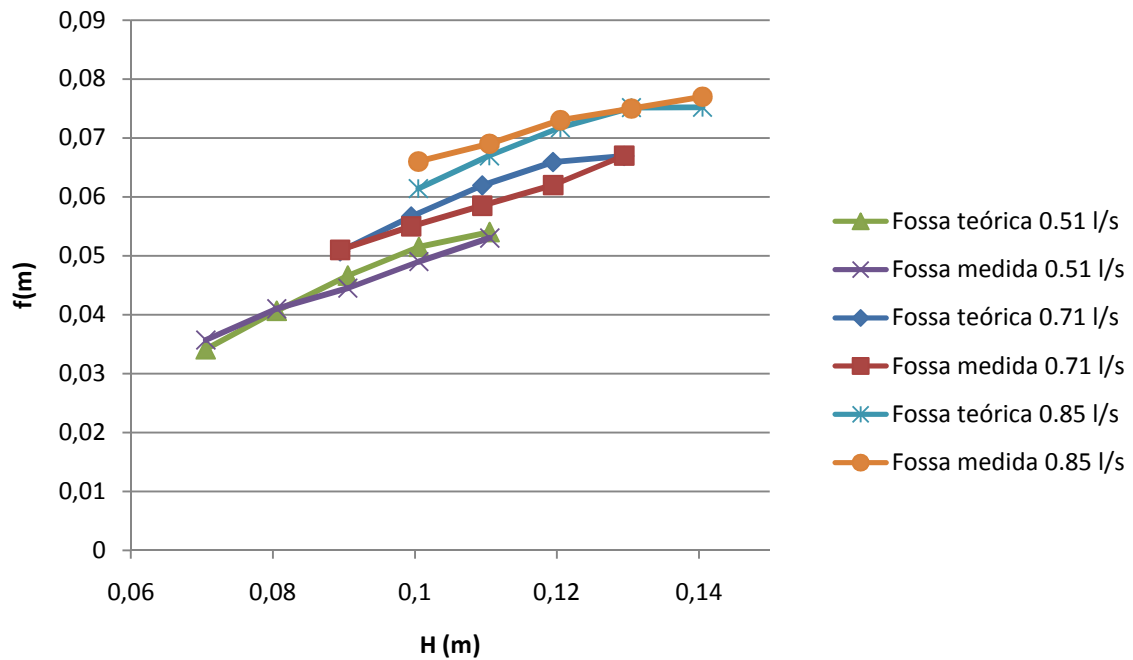


Figura 4.52. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mason & Arumugam (B) com K calculado através da expressão (2.16.)

Quadro 4.37. – Valores de K propostos no cálculo dos parâmetros apresentados nas figuras 4.51. e 4.52.

	h (m)	K
Q=0,51 l/s	0,01	2,823122
	0,02	2,857062
	0,03	2,894188
	0,04	2,935205
	0,05	2,98109
Q=0751 l/s	0,01	2,765827
	0,02	2,79508
	0,03	2,826626
	0,04	2,860879
	0,05	2,898385
Q=0,85 l/s	0,01	2,735864
	0,02	2,762965
	0,03	2,792004
	0,04	2,823299
	0,05	2,857255

Este estudo deverá, contudo ser completado com o estudo de outros materiais constituintes do leito móvel e por uma gama de caudais mais abrangente.

Uma análise conjunta das fossas registadas nos ensaios e dos valores de pressões levou à apresentação, nas figuras 4.53. a 4.57., de esquemas com representação simultânea de traçado da fossa e de linhas representativa de pressão média e flutuação de pressão (os restantes esquemas encontram-se no anexo VIII).

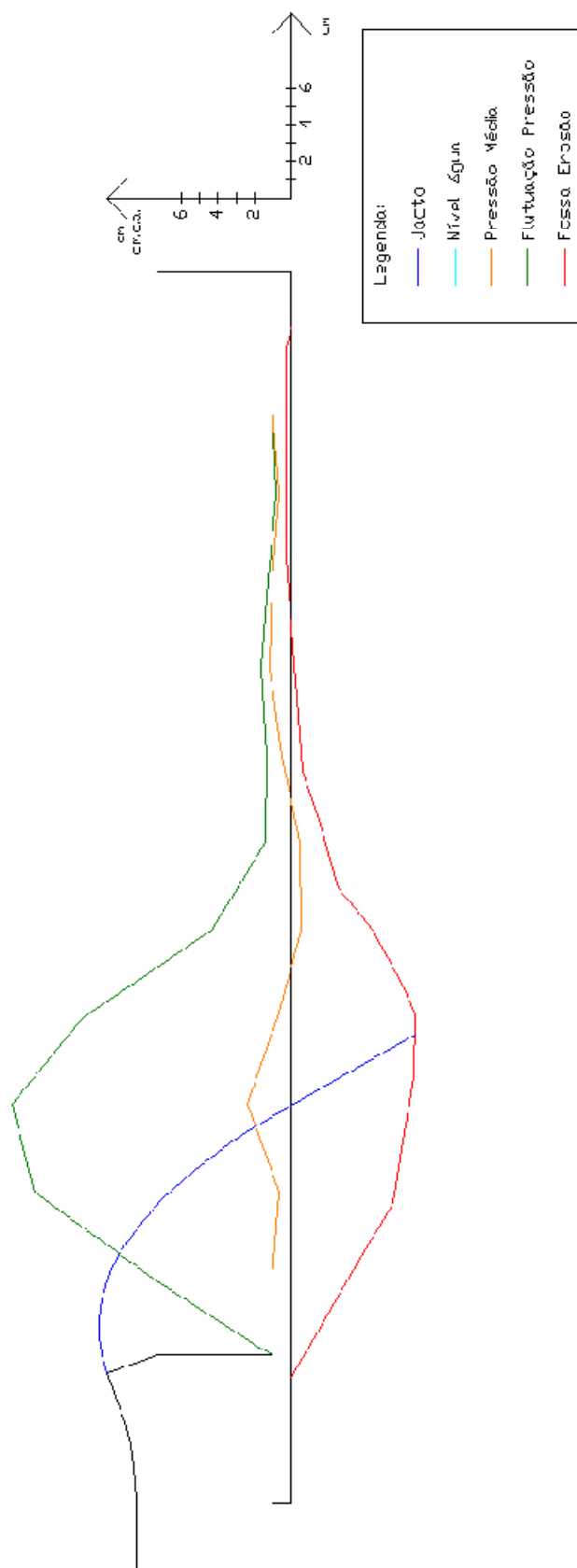


Figura 4.53. – Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm)



Figura 4.54. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm)

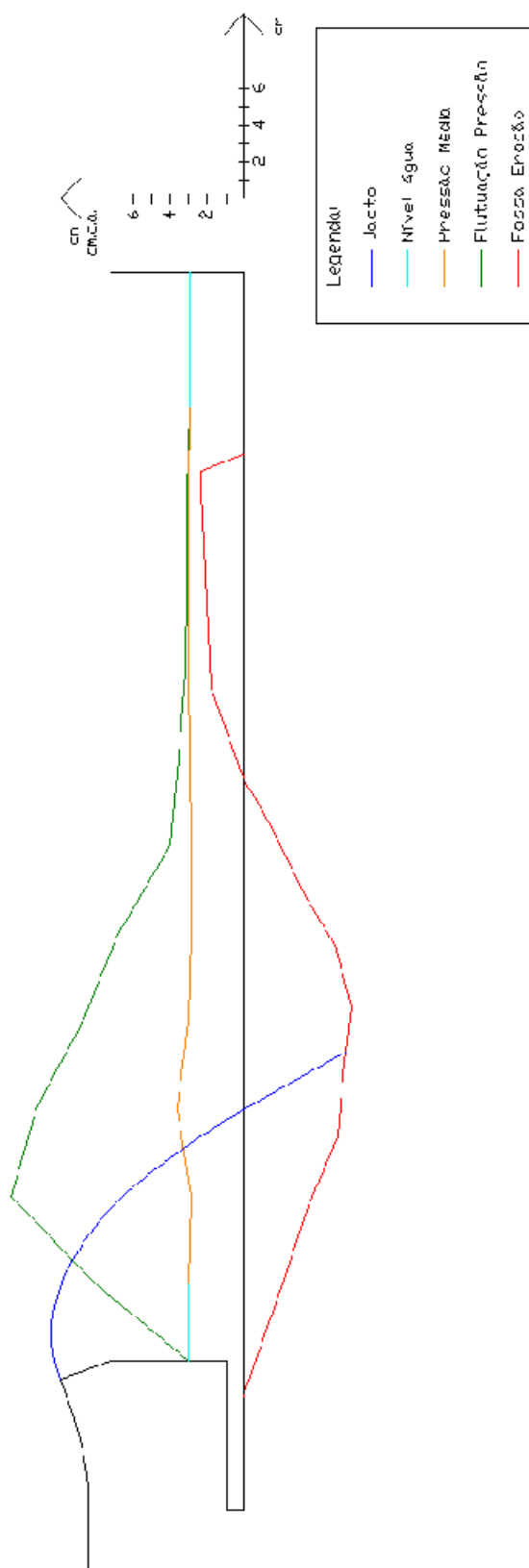


Figura 4.55. - Esquema representativo de fossos de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm)

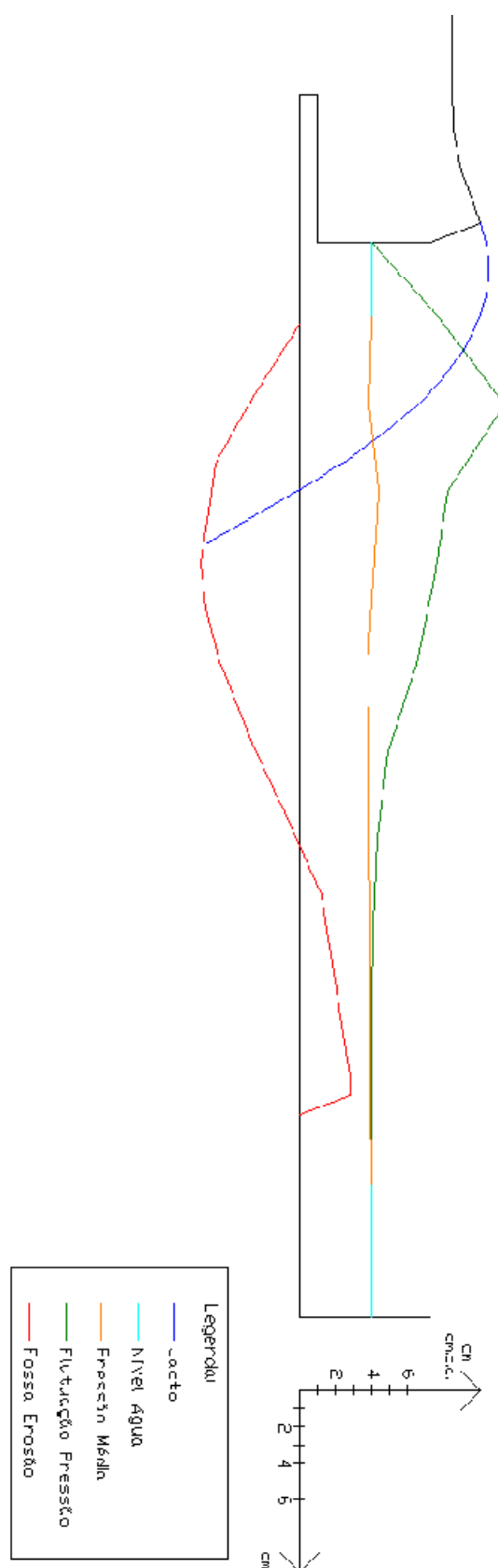


Figura 4.56. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm)



Figura 4.57. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm)

A observação das figuras permite referir que:

- a) O ponto de maior profundidade no perfil da fossa de erosão está aproximadamente na direcção da trajectória do jacto. A utilização de diferentes ângulos de saída do trampolim em salto de esqui permitiria uma melhor análise da questão;
- b) Para colchões de pequena espessura verifica-se, através da análise dos valores das pressões e das flutuações de pressão medidas, que há uma forte sucção no material do leito. Contrariamente, para os colchões de maior espessura a análise daqueles valores não permitiria concluir a existência desses valores negativos de pressões nem faria prever a ocorrência da fossa de erosão verificada. De notar o anteriormente referido no que se refere aos valores das pressões instantâneas verificadas levando a que durante grande parte do ensaio se verifiquem na realidade valores de pressão negativos;
- c) Relativamente às barras formadas em torno da fossa de erosão estas são de altura decrescente com a diminuição da espessura do colchão de água no entanto, a sua extensão aumenta com a diminuição dessa espessura provavelmente devido às maiores velocidades de escoamento e menores pressões.

5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

5.1. CONCLUSÕES

Nos trabalhos apresentados nesta dissertação procedeu-se ao estudo experimental da dissipação de energia a jusante de um descarregador de degraus munido, a jusante, de um trampolim em salto de esquí.

Foi utilizado apenas um modelo de trampolim tendo sido, para esse modelo, realizados ensaios em fundo fixo e fundo móvel constituído por material granular não coerente.

Nos ensaios em fundo fixo foram levados a cabo estudos de trajectórias dos jactos provenientes das descargas, medições de pressões médias e flutuações de pressão para várias situações de escoamento correspondentes a diferentes caudais e diferentes espessuras de colchões de água a jusante. Quanto às medições de pressão foram utilizadas sondas piezo-eléctricas para medição de flutuações de pressão e um transdutor diferencial de pressão para pressões médias. Para o estudo das trajectórias dos jactos utilizou-se a técnica de aquisição de imagens (T.A.I.) e, na avaliação da altura de água à saída do trampolim, um sistema de flutuador/potenciómetro.

Os ensaios em fundo móvel foram realizados com o objectivo de analisar as consequências no que se refere à ocorrência de fossas de erosão pela acção das descargas de cheia.

Relativamente aos sistemas de medida utilizados estes revelaram-se eficazes, sendo de notar a utilização das técnicas inovadoras de medição de flutuações de pressão através de sondas piezo-eléctricas e da técnica de aquisição de imagens cujas aplicações se mostraram de sucesso. A medição de alturas de água através de flutuador/potenciómetro revelou algumas limitações para pequenos caudais em virtude do tipo de escoamento no ponto onde se pretendia aplicar o sistema de medida.

Foram medidas pressões médias no leito fixo do canal de restituição tendo-se concluído que, pressões negativas originando sucção nesse mesmo leito apenas se verificaram, para os caudais testados, para espessuras de colchão mais reduzidas ($h \approx 1$ cm). Relativamente ao colchão de água de maior espessura ($h \approx 5$ cm) verificou-se que, para esses caudais, a pressão média registada praticamente não difere da pressão estática exercida pelo próprio colchão exceptuando no ponto de impacto do jacto e ainda assim, para o máximo caudal testado (2,40 l/s), com variações máximas da ordem dos 20%.

Registaram-se, utilizando sondas piezo-eléctricas, as flutuações de pressão no mesmo leito fixo. Foram determinados os valores R.M.S. de flutuação de pressão correspondentes aos caudais e colchões de água de teste tendo-se concluído que, para o ponto de impacto e pontos adjacentes a este, para menores espessuras de colchão de água a grandeza das flutuações excede o valor das pressões médias. O mesmo não se verifica para os colchões de água de maior espessura.

No entanto, a análise das flutuações de pressão em função do tempo permite apurar que para todos os caudais e espessuras de colchões testados existem picos de pressão, em grande parte do tempo, que fazem com que as pressões instantâneas tomem valores elevados positivos e negativos. O exemplo de caudal de 0,71 l/s aliado a um colchão de água de 5 cm de altura mostra, pelos registos obtidos pela placa de aquisição de dados, valores instantâneos de pressão no intervalo entre -75 cm.c.a a 30 cm.c.a..

Os ensaios em fundo móvel permitiram avaliar as características e dimensões das fossas de erosão geradas e a sua comparação com valores teóricos obtidos através das expressões da literatura. Foi sentida, neste estudo, alguma dificuldade em definir as condições de aplicabilidade das expressões referidas o que justificará as discrepâncias encontradas nos resultados experimentais comparativamente com os valores teóricos. Verificou-se que algumas fórmulas conduzem a resultados com sentidos de variação inversos do parâmetro D (profundidade máxima da escavação medida a partir da superfície livre a jusante) em função da queda, H, embora esse sentido de variação seja o mesmo quando se considera o parâmetro f (profundidade de erosão relativamente ao leito inicial) em função da mesma queda.

Neste estudo conclui-se que as fórmulas que conduziam a um melhor ajuste eram as de Martins (B) e ambas as expressões de Mason & Arumugam. As fórmulas de Mason & Arumugam podem ainda ser adaptadas através da alteração do parâmetro K, tradutor das características do material do leito móvel. Refere-se também o facto de as expressões de Mason & Arumugam, que melhor se adequam ao caso de estudo, considerarem um diâmetro característico que não corresponde ao realmente utilizado experimentalmente. A utilização de materiais diferentes do leito testado poderia ter permitido consolidar estas considerações.

A análise das fossas relacionada com as medições de pressão (pressões médias e flutuações de pressão) realizadas não permitiria, nos casos de colchões de água com maior espessura, concluir, de antemão, a formação de fossa de erosão facto que, no entanto, pode ser justificado pela análise das características da variação do sinal de flutuação de pressão ao longo do tempo, como anteriormente referido.

A forma do perfil longitudinal das erosões dependerá, em princípio, da trajectória do próprio jacto e esta das características do trampolim em salto de esquí utilizado. A utilização de outros trampolins teria permitido uma análise mais detalhada do assunto.

As características do material do leito móvel, quer no que se refere ao seu peso específico quer aos diâmetros dos seus elementos constituintes, deverão influenciar as configurações das fossas resultantes das descargas. A utilização de vários materiais e a procura do material resistente à formação dessa fossa de erosão teria igualmente permitido uma maior pormenorização neste estudo.

5.2. SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

Tendo em atenção o acima referido e as dificuldades sentidas na análise dos resultados obtidos, pela necessidade de informação complementar, recomendam-se as seguintes propostas e desenvolvimentos futuros:

- Sob o ponto de vista da Engenharia Civil deverá estudar-se a escolha de solução para evitar a formação de fossa para cada condição de escoamento utilizando a solução de tapetes de protecção que deverão ser dimensionados tendo por base a sua estabilidade e segundo critérios que dependem da sua granulometria;
- Utilização de transdutores de pressão adequados à medição de pressões e flutuações de pressão para maior rapidez e total coincidência de dados adquiridos;

- Medição de pressões e flutuações da mesma em malha de pontos mais apertada e situada não só no eixo do jacto mas também nas zonas laterais circundantes, para uma melhor compreensão do fenómeno;
- Análise mais cuidadosa da possibilidade de medição das alturas de água no trampolim em salto de esquí recorrendo a transdutores de pressão o que permitiria, em cada caso de estudo, confirmar os valores registados por vários métodos;
- Utilização de diferentes modelos de trampolim em salto de esquí, com diferentes ângulos de saída, permitindo a análise de diferentes trajectórias de jactos;
- Aumento da dimensão do canal de restituição permitindo, deste modo, alargar a gama de caudais de teste para os ensaios em fundo móvel;
- Aplicação de vários materiais na constituição do fundo móvel para a análise da configuração de fossas quando sujeitos à mesma condição do escoamento;

BIBLIOGRAFIA

- [1] Smith, G. L. *Scour and energy dissipation below culvert outlets*. Fort Collins, Colorado Agricultural and Mechanical College, 1957.
- [2] Solov'eva, A. G. *Investigation of the riverbed deformation in the tailrace of the Kransnoyarsk hydroelectric power plant caused by the discharge through the bottom outlets of the first construction stage*. "Tranlsations of the VNIIG", n.º 88, 1969 (Translated by Israel Program for Scientific Translations).
- [3] Yuditskii, G. A. *Acção hidrodinâmica de uma lâmina descarregada sobre blocos de um leito rochoso e condições de rotura deste*. "Izvestiya VNIIG", n.º 72, 1963 (Trad. N.º 442 do LNEC).
- [4] Escande, L. *Evacuateur de crues pour barrages de grande hauteur*. 4º Congresso da AIRH, Bombay, AIRH, 1951.
- [5] Horeni, P. *Disintegration of a free jet of water in air*. Praha, 1956.
- [6] Peterka, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Washington, Bureau of Reclamation, 1978.
- [7] Bureau of Reclamation. *Design of small dams*. 3.ª edição, Washington, 1965.
- [8] Gun'ko, F. G. et al. *Research on the hydraulic regime and local scour of river bed below spillways of high-head dams*. 11.º Congresso da AIRH, Volume III, Haye, AIRH, 1955.
- [9] Kawakami, I. A. *Alcance de jactos livres provenientes de descarregadores*. (Tradução n.º 487 do LNEC). "Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo", n.º 3, 1966.
- [10] Zvorykin, K.A., Kouznetsov, N. V., Akhmedov, T.K. *Scour of Rock bed by a jet spilling from a deflecting bucket of an overflow dam*. 16th IAHR Congress, São Paulo, 1975.
- [11] Mason, P. J, Arumugam, K. *Free jet scout below dams and slip buckets*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, n.º 2, pp 220-235, 1985.
- [12] Wu, C. M. *Scour at downstream end of dams in Taiwan*. Proc. IAHR Symp. On river mechanics, Bangkok, paper A13, 1973.
- [13] Damle, P.M. et al. *Evaluation of scour below ski jump bucket of spillways*. Proc. Golden Jubilee Symp., Poona; pp. 154-164, 1966.
- [14] Eggenberger, W., Müller, R. *Experimentalle und theoretische untersuchungen über das kolkproblem*. "Mitteilung", n.º5, Versuchsanstalt für Wasserbau, Zürich, 1944.
- [15] Franke, P. G. *L'affouillement: mécanisme et formes*. Oesterreichische Wasserwirtschaft, Jan. 1960 (Trad. n.º. 681 da Electricité de France).
- [16] Hartung, W. *Affouillement à l'aval des barrages déversants, lié à la formation de fonds mobiles sous le déversement*. "Die Wasserwirtschaft", n.º 12, 1959 (Trad. n.º 670 da Electricité de France).
- [17] Raudkivi, A. J. *Curso Latinoamericano de Mecánica Fluvial*. LHA – INCYTH, 1985.
- [18] Machado, L. I. *Fórmulas para calcular o limite de erosão em leitos rochosos ou granulares*. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, 1980.
- [19] Martins, R. *Cálculo da profundidade de escavações provocadas por jactos oriundos de descarregadores com trampolim*. Memória n.º 634 do LNEC, Lisboa, 1984.

- [20] Patrashev, A. N. *Détermination de la profondeur maximale de l'érosion du sol par une nappe tombante*. "Izvestiya VNIIG", n.º 21, 1937.
- [21] Schoklitsch, A. *Prevention of scour and energy dissipation*. Denver, 1937 (Tradução para inglês do texto original em alemão "Kolkbauwehr und Staurationberlandung, Berlin, Julius Springer, pp. 17-183, 1935).
- [22] Taraimovich, I. I. *Deformations of channels below high-head spillways on rock foundations*. Hydrotechnical Construction, n.º 9, 1978.
- [23] Veronese, A. *Erosioni de fonde a valle di uno scarico*. "Annali dei Lavori Pubblici", Vol. 75, n.º 9, pp. 717-726, Itália, Setembro, 1937.
- [24] Jaeger C. *Über die Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellversuchen*. "Wasserwirtschaft und Wassertechnik", 34, No. 23/27, 1939.
- [25] Martins, R. *Acção erosiva de jactos livres a jusante de estruturas hidráulicas*. Memória n.º 424 do LNEC, Lisboa, 1973.
- [26] Mason, P.J., Arumugam, K. *Free jet scour below dams and flip buckets*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 111, n.º 2, ASCE, 220-235, 1985;
- [27] Gun'ko, F. G., et al. *Research on the Hydralic Regime and Local Scour of River Bed below Spillways of High Head Dams*. International Association for Research Conference n.º XI, Vol. 1, Paper 1.50, Leningrad, U.S.S.R., 1965.
- [28] Ghodsian, M., Faradonbeh, A. A., Abbasi, A. A. *Scour downstream of free overfall spillway*. Proceedings of 28th IAHR Congress. Graz, Austria, 1999.
- [29] Davis, C. V., Sorensen, K. E. *Handbook of Applied Hydraulics*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1969.
- [30] Mikhalev, M. A. *Détermination de la profondeur d'affouillement d'une fondation non rocheuse par un jet incliné*. "Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo", n.º. 0, 1960 (Trad. n.º 804 da Electricité de France).
- [31] Mirtskhulava, T. E. et al. *Mechanism and computation of local and general scour in non-cohesive, cohesive soils and rock beds*. 12.º Congresso da AIRH, vol. III, Fort Collins, AIRH, 1967.
- [32] Mirtskhulava, T. E. *Alguns problemas da erosão local nos leitos dos rios*. Moskva, 1967 (Trad. n.º 443 do LNEC).
- [33] Yildiz, D., Üzücek, E. *Prediction of Scour Depth from Free Falling Flip Bucket Jets*. International Water Power and Dam Construction, November 1994.
- [34] Lencastre, A. *Hidráulica de Estruturas – Descarregadores*. LNEC, 2001.
- [35] Aleixo, R., Proença, M. F., *Medição da trajetória de um jacto livre usando aquisição de imagens*. 2^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Outubro, 2007.
- [36] Hager, W. H., Schleiss, A. J. *Constructions Hydrauliques: écoulements stationnaires*. Presses Polytechniques et universitaires Romandes, 2009.
- [37] Khatsuria, R. M. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Marcel Dekker, New York, 2005.
- [38] Melo, J. F., Ramos, C. M. *Previsão da erosão em maciços rochosos por acção de jactos*. 3.º Congresso da Água : a água em Portugal, por uma política de excelência. II vol., p. 505-516, 1996.

- [39] Hoffmans, G. J. C. M., Verheji, H. J. *Scour Manual*. Taylor & Francis, January, 1997.
- [40] http://cnpqgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/index.htm 15-06-2010.
- [41] <http://www.hydrostec.com.br/> 16-06-2010.
- [42] Lemos, J. F., *Aproveitamentos Hidráulicos: Aulas Teóricas*. 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.
- [43] Proença, M.F., *Aproveitamentos Hidráulicos: Aulas Práticas*. Apontamentos 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.
- [44] Lencastre, A., *Descarregadores de Cheia – Com particular incidência sobre a dissipação de energia em jactos cruzados*. Dissertação apresentada para provas de doutoramento em Hidráulica Aplicada, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1984.

Anexos

Anexo I

ENSAIO GRANULOMÉTRICO DO MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS EM FUNDO MÓVEL

Análise Granulométrica de Agregados

Norma de referência: **NP 933-1 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1:**
Análise Granulométrica. Método de Peneiração

Requisição nº

Data de ensaio: 11-05-10

Boletim nº

Referência da amostra: s/lavagem

procedimento usado:	☐ lavagem e peneiração	☒ peneiração a seco
☒ Série Base	☐ Série Base + Série 1	☐ Série Base + Série 2

M ₁ - Massa total da amostra seca	(g)	<u>254,3</u>
M ₂ - Massa seca do material retido no peneiro 0,063mm após lavagem	(g)	
Massa seca de finos removidos por lavagem (M ₁ - M ₂)	(g)	

Abertura dos peneiros (mm)			Massa Retida (R _i) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
Série Base	Série 1	Série 2				
63,0						
	45,0					
		40,0				
31,5						
	22,4					
		20,0				
16,0						
		14,0				
		12,5				
	11,2					
		10,0				
8,0			0			
		6,3	0			
	5,6		0			
4,00			4,1			
2,00			50,6			
1,00			87,3			
0,500			82,6			
0,250			15,9			
0,125			2,5			
0,063			0,7			
P			0,6			

Validação dos resultados

$\Sigma R_i + P$	
$M_2 - (\Sigma R_i + P)$	

1% M ₂	
-------------------	--

Os resultados são válidos se $M_2 - (\Sigma R_i + P)$ for inferior a 1% da massa M₂

Observações:

Ensaio realizado por: 

Figura I.1. - Ficha de ensaio de análise granulométrica de agregados

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

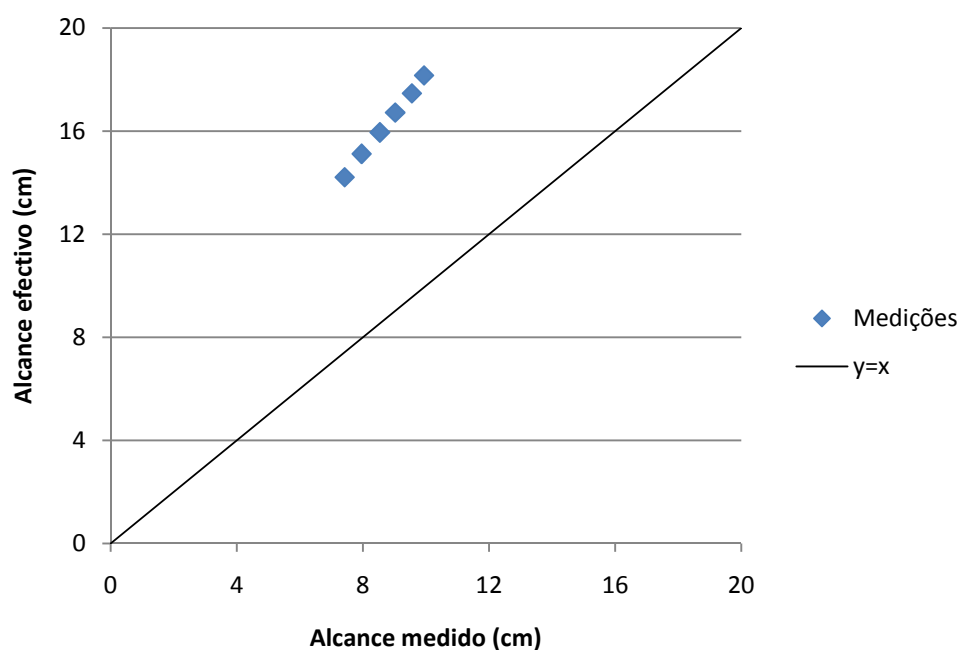
Abertura dos peneiros (mm)	Massa Retida (R _i) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
63,0	0,0	0,0	0,0	100,00
31,5	0,0	0,0	0,0	100,00
16,0	0,0	0,0	0,0	100,00
8,0	0,0	0,0	0,0	100,00
4,0	4,1	1,61	1,61	98,39
2,0	50,6	19,87	21,48	78,52
1,0	97,3	38,20	59,68	40,32
0,500	82,6	32,43	92,11	7,89
0,250	15,9	6,24	98,35	1,65
0,125	2,5	0,98	99,33	0,67
0,063	0,7	0,27	99,61	0,39
P	0,6	0,24	99,84	0,16

Anexo II

TRAJECTÓRIA DE JACTOS

Quadro II.1. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	532	9,94	1,05	0,06	0,10	18,16	67,13	55,69	-8,21	11,44
1	511	9,55	1,05	0,06	0,09	17,46	66,24	54,37	-7,90	11,87
2	483	9,03	1,05	0,06	0,08	16,72	64,47	52,87	-7,69	11,60
3	457	8,54	1,05	0,06	0,07	15,94	63,16	51,17	-7,40	11,99
4	426	7,96	1,05	0,06	0,06	15,11	61,89	49,20	-7,14	12,69
5	397	7,42	1,05	0,06	0,05	14,21	59,39	46,88	-6,79	12,51

Figura II.1. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água

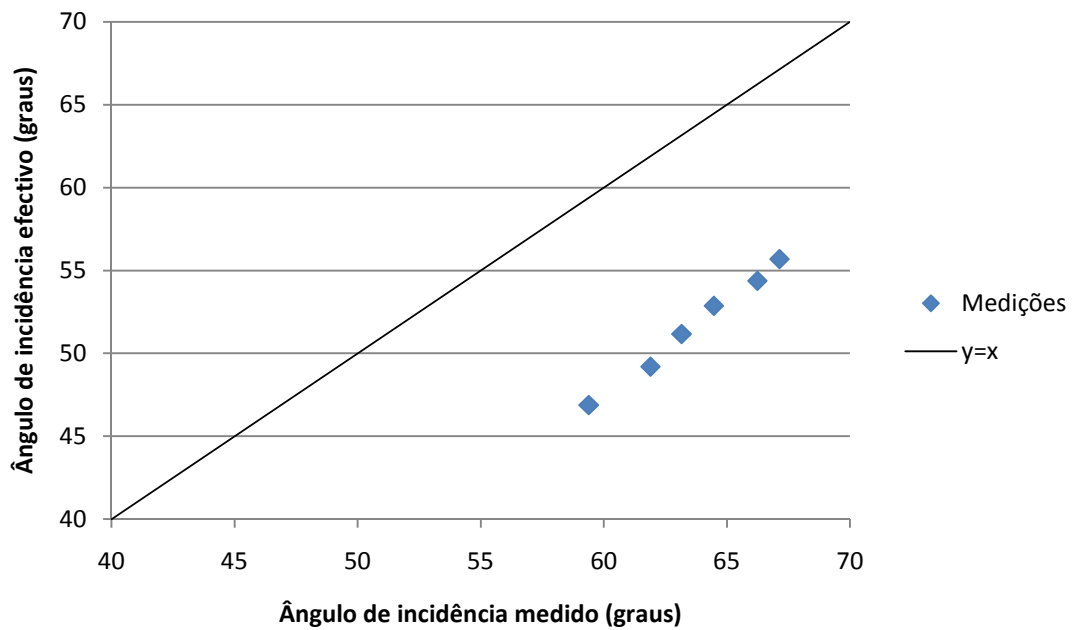


Figura II.2. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.2. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,71$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	782	14,62	1,14	0,07	0,10	20,06	60,43	53,69	-5,44	6,74
1	750	14,02	1,14	0,07	0,09	19,31	58,50	52,35	-5,29	6,15
2	719	13,44	1,14	0,07	0,08	18,52	57,31	50,85	-5,08	6,46
3	681	12,73	1,14	0,07	0,07	17,68	55,57	49,14	-4,95	6,43
4	644	12,04	1,14	0,07	0,06	16,78	53,82	47,18	-4,74	6,64
5	604	11,29	1,14	0,07	0,05	15,82	51,71	44,89	-4,53	6,82

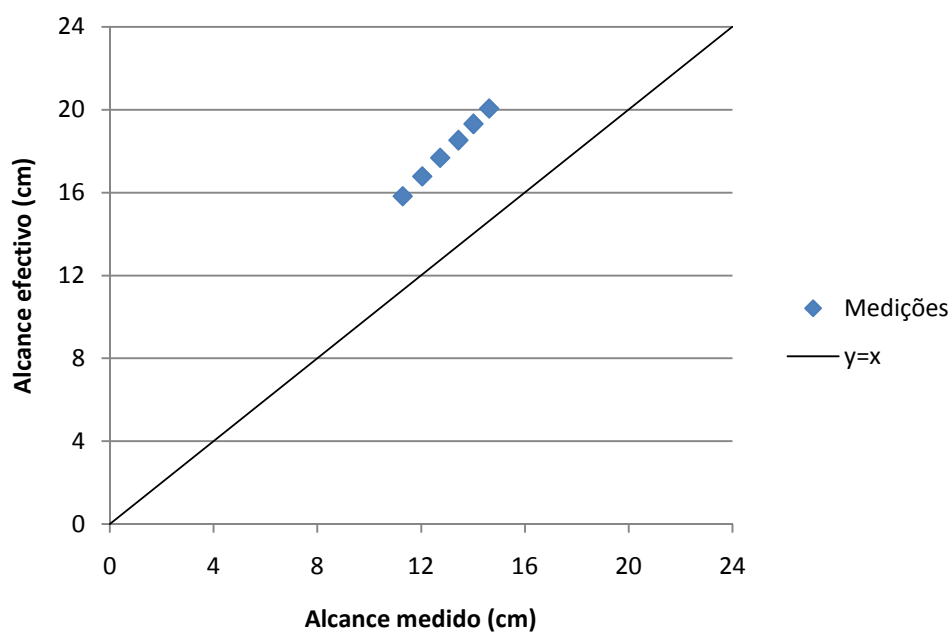


Figura II.3. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,71$ l/s e diferentes valores do colchão de água

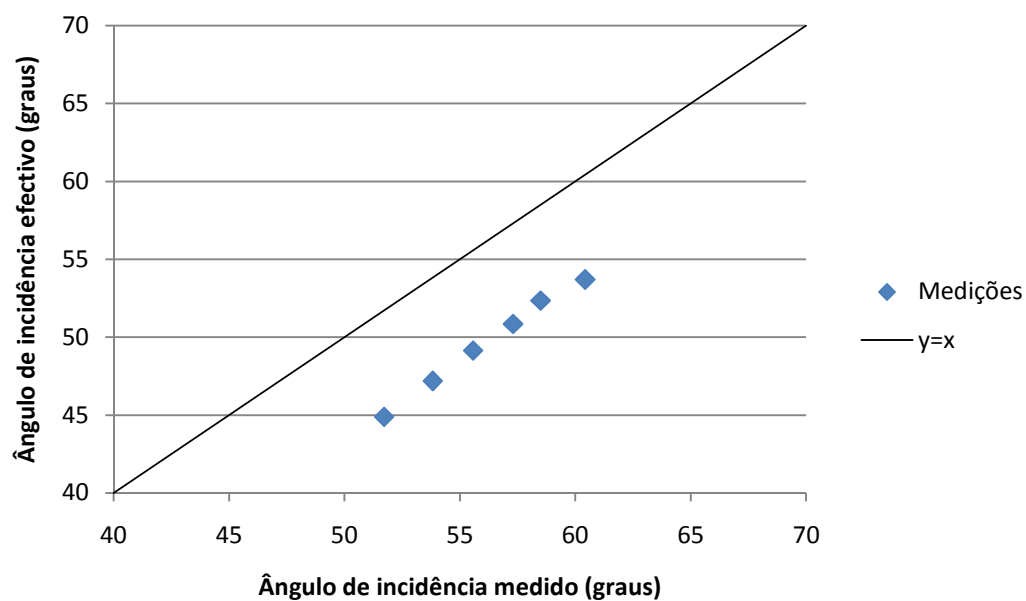


Figura II.4. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,71$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.3. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,85$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	909	16,99	1,20	0,07	0,10	21,38	56,73	52,42	-4,39	4,31
1	876	16,37	1,20	0,07	0,09	20,59	55,55	51,07	-4,22	4,48
2	831	15,53	1,20	0,07	0,08	19,76	54,02	49,56	-4,23	4,46
3	792	14,80	1,20	0,07	0,07	18,89	52,52	47,86	-4,08	4,66
4	753	14,07	1,20	0,07	0,06	17,95	50,38	45,92	-3,88	4,46
5	705	13,18	1,20	0,07	0,05	16,94	48,11	43,66	-3,77	4,45

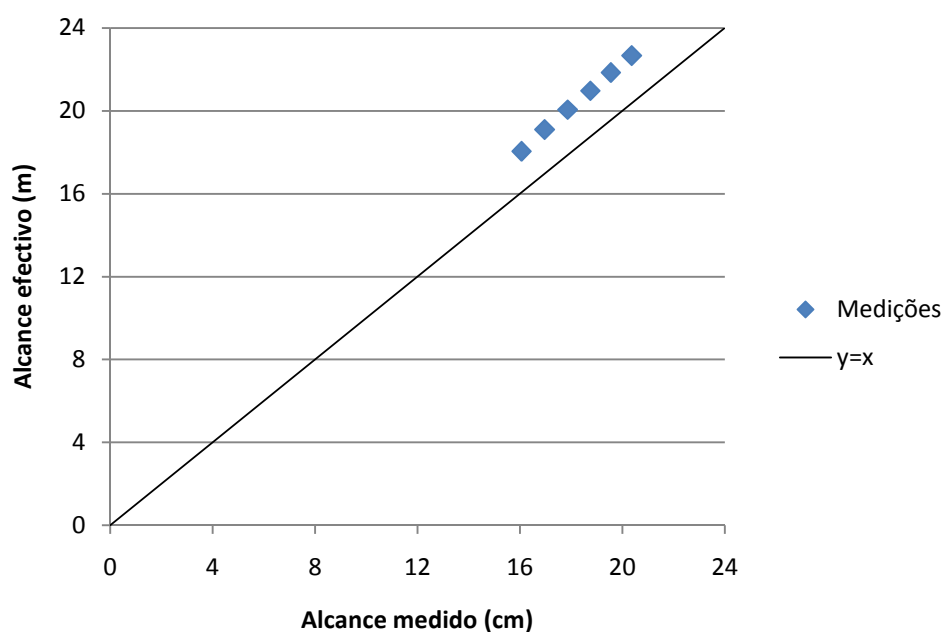


Figura II.5. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,85$ l/s e diferentes valores do colchão de água

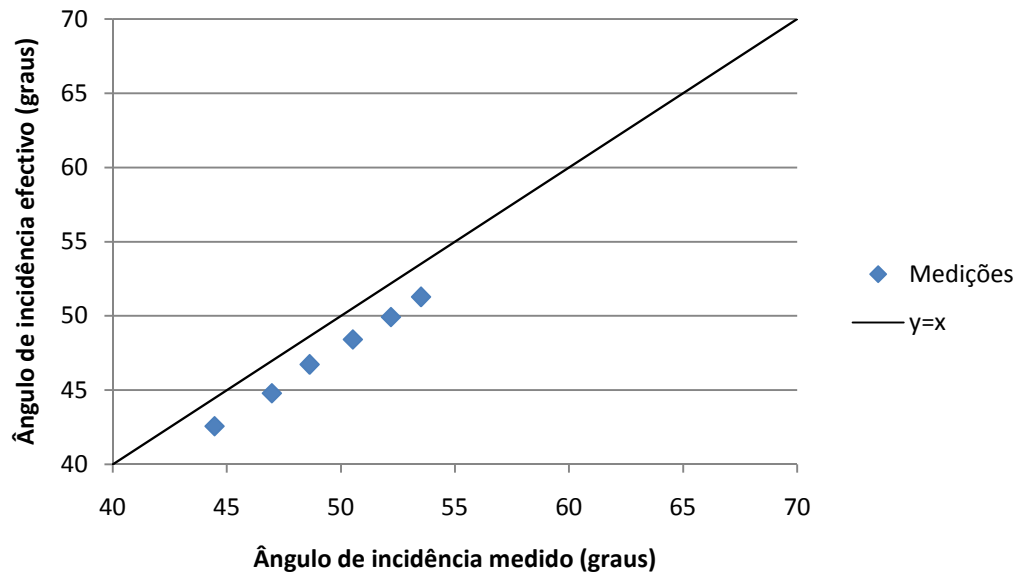


Figura II.6. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,85$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.4. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,99$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1090	20,37	1,25	0,08	0,10	22,66	53,51	51,27	-2,28	2,24
1	1046	19,55	1,25	0,08	0,09	21,84	52,19	49,92	-2,28	2,27
2	1003	18,75	1,25	0,08	0,08	20,97	50,52	48,41	-2,22	2,11
3	956	17,87	1,25	0,08	0,07	20,06	48,62	46,72	-2,19	1,90
4	908	16,97	1,25	0,08	0,06	19,09	46,97	44,79	-2,11	2,18
5	859	16,06	1,25	0,08	0,05	18,04	44,46	42,56	-1,98	1,90

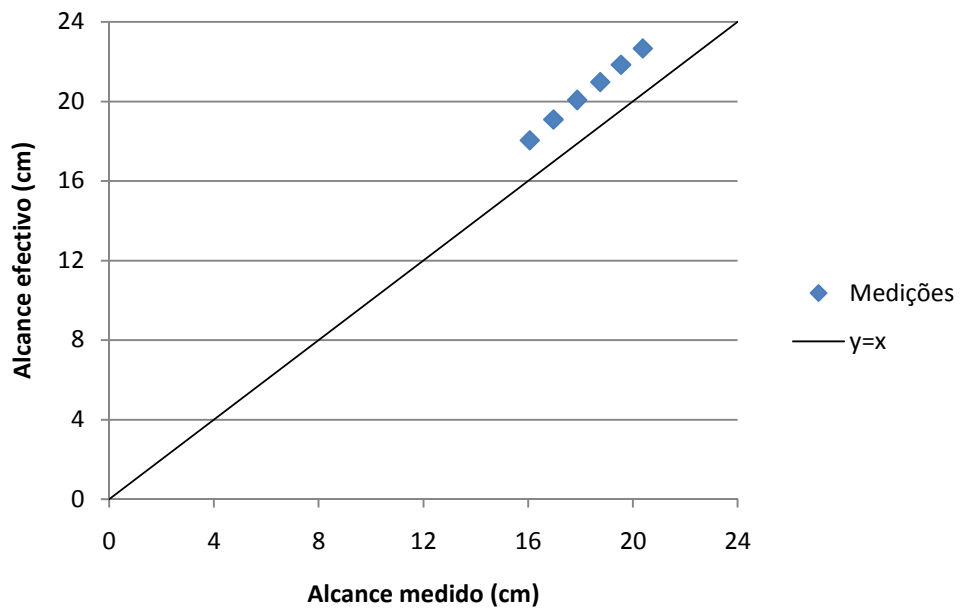


Figura II.7. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,99$ l/s e diferentes valores do colchão de água

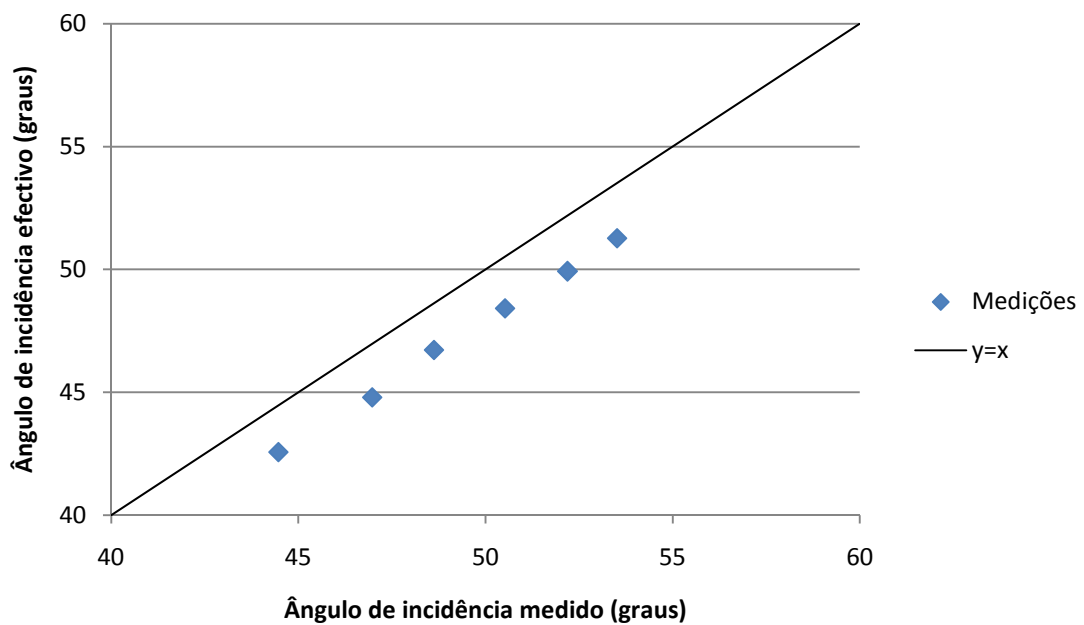
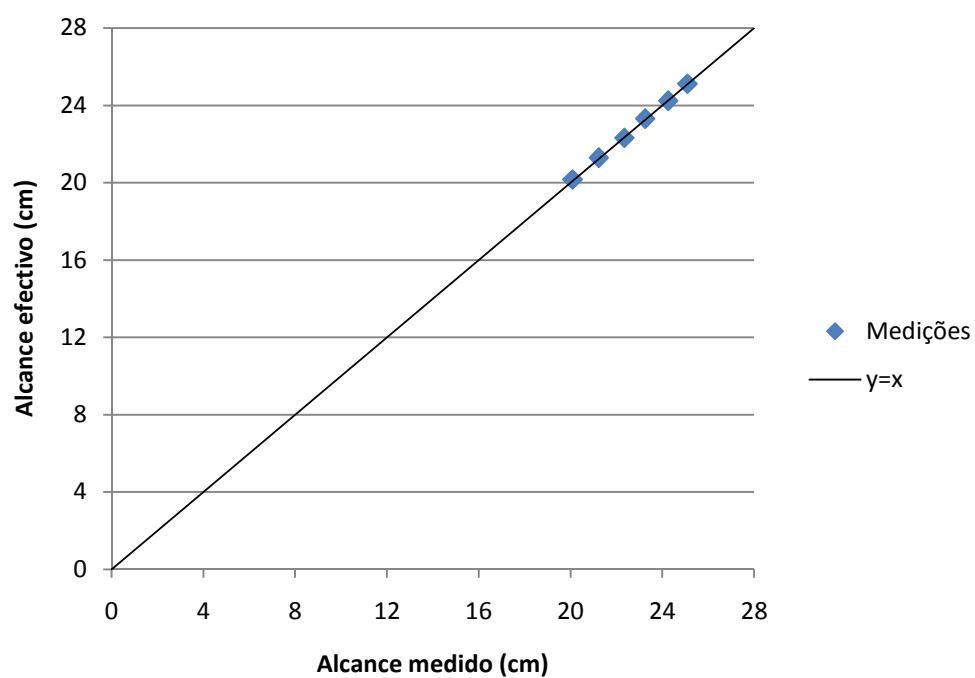


Figura II.8. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,99$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.5. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,27$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1343	25,10	1,35	0,09	0,10	25,11	49,44	49,25	-0,01	0,19
1	1298	24,26	1,35	0,09	0,09	24,23	47,59	47,91	0,03	-0,32
2	1244	23,25	1,35	0,09	0,08	23,30	46,07	46,42	-0,05	-0,35
3	1195	22,34	1,35	0,09	0,07	22,32	44,56	44,75	0,02	-0,19
4	1136	21,23	1,35	0,09	0,06	21,28	42,48	42,86	-0,04	-0,38
5	1075	20,09	1,35	0,09	0,05	20,16	40,60	40,70	-0,07	-0,10

Figura II.9. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,27$ l/s e diferentes valores do colchão de água

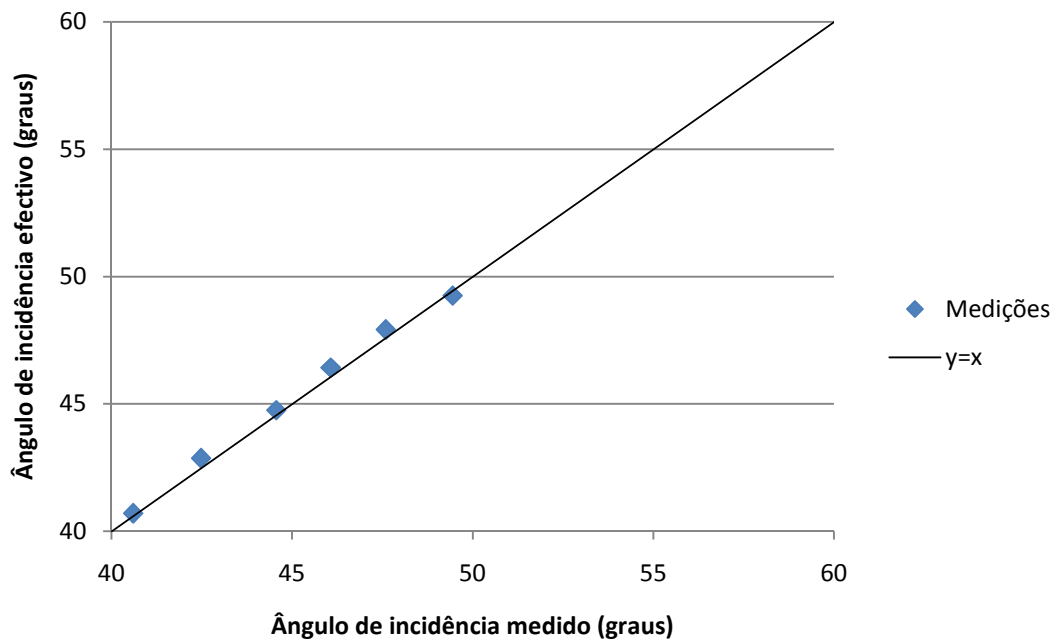


Figura II.10. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,27$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.6. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,77$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1549	28,95	1,51	0,12	0,10	28,96	46,45	46,52	0,00	-0,07
1	1495	27,94	1,51	0,12	0,09	27,99	44,83	45,20	-0,04	-0,37
2	1442	26,95	1,51	0,12	0,08	26,97	43,73	43,75	-0,01	-0,02
3	1383	25,85	1,51	0,12	0,07	25,89	41,77	42,13	-0,04	-0,36
4	1322	24,71	1,51	0,12	0,06	24,75	40,64	40,32	-0,04	0,32
5	1258	23,51	1,51	0,12	0,05	23,53	38,13	38,27	-0,02	-0,14

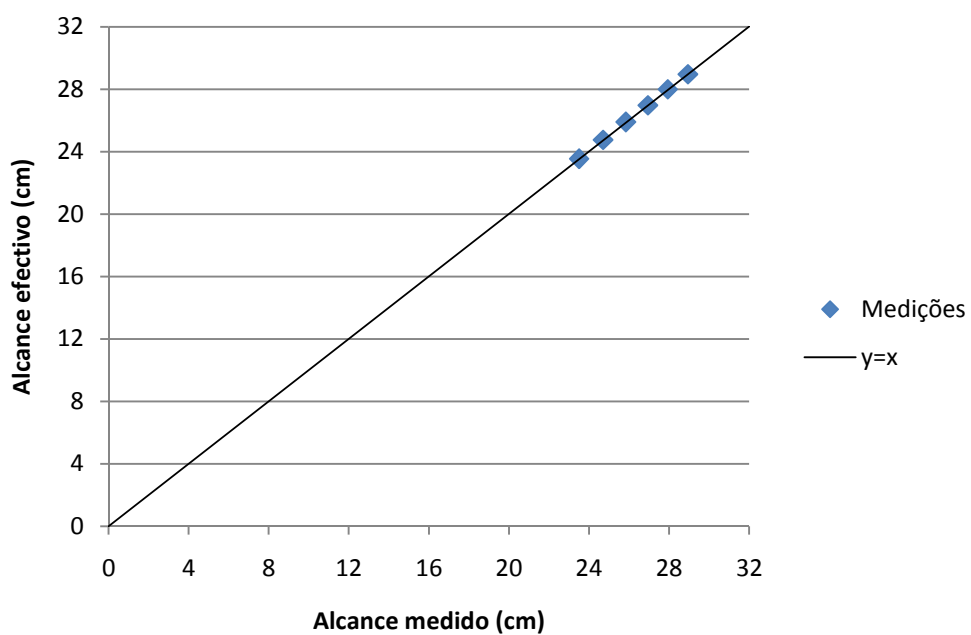


Figura II.11. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,77$ l/s e diferentes valores do colchão de água

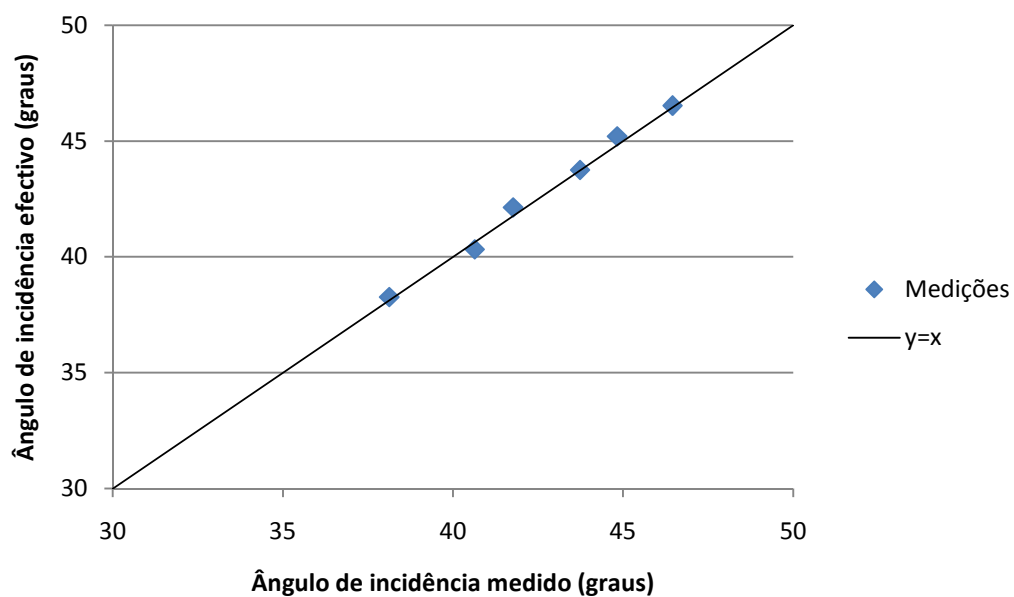
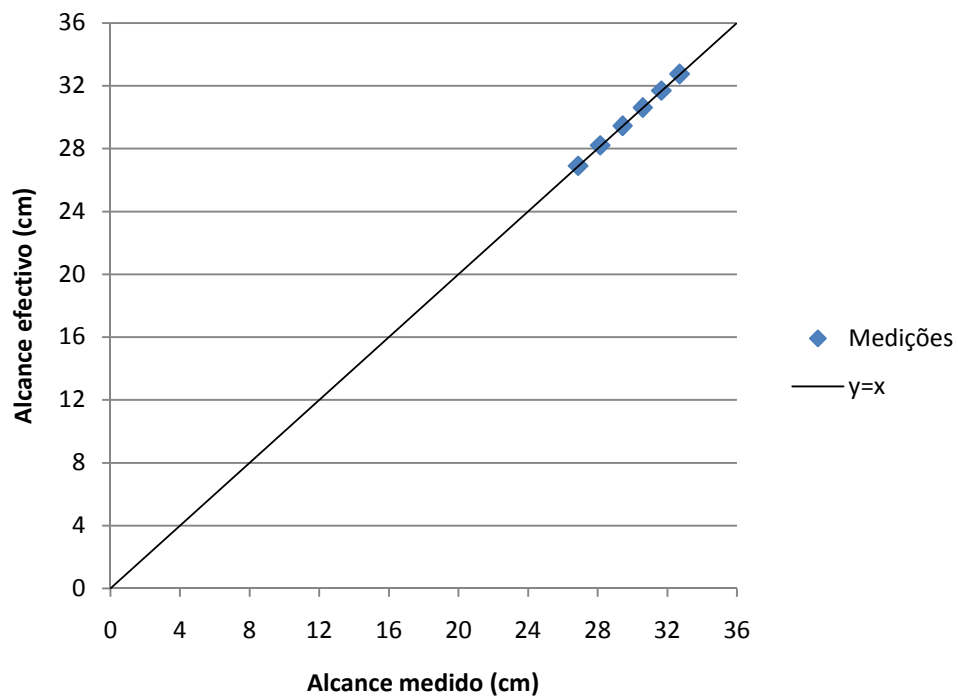


Figura II.12. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,77$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.7. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=2,40$ l/s e diferentes valores do colchão de água

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1750	32,71	1,65	0,14	0,10	32,74	44,35	44,27	-0,03	0,08
1	1694	31,66	1,65	0,14	0,09	31,70	43,00	42,98	-0,03	0,02
2	1636	30,58	1,65	0,14	0,08	30,60	41,39	41,57	-0,02	-0,18
3	1574	29,42	1,65	0,14	0,07	29,44	39,68	40,02	-0,02	-0,34
4	1506	28,15	1,65	0,14	0,06	28,21	38,53	38,29	-0,06	0,24
5	1438	26,88	1,65	0,14	0,05	26,90	36,22	36,34	-0,02	-0,12

Figura II.13. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=2,40$ l/s e diferentes valores do colchão de água

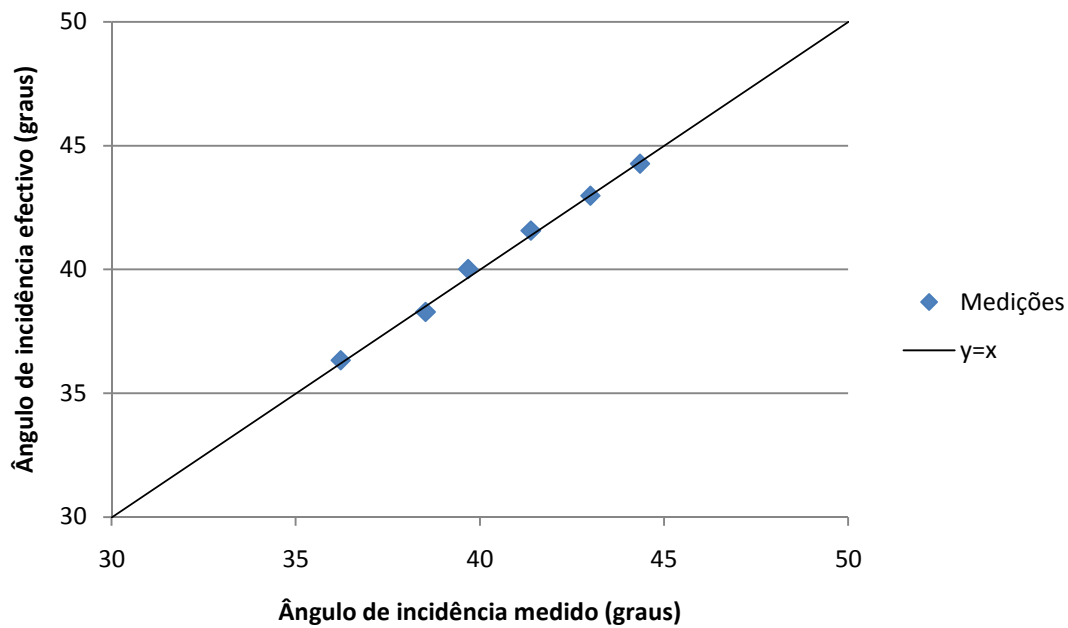


Figura II.14. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=2,40$ l/s e diferentes valores do colchão de água

Quadro II.8. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	532	9,94	0,64	0,0206	0,10	9,94	67,13	67,17	0,00	-0,04
1	511	9,55	0,64	0,0206	0,09	9,51	66,24	66,10	0,04	0,14
2	483	9,03	0,64	0,0206	0,08	9,06	64,47	64,86	-0,03	-0,39
3	457	8,54	0,64	0,0206	0,07	8,57	63,16	63,40	-0,03	-0,24
4	426	7,96	0,64	0,0206	0,06	8,05	61,89	61,66	-0,09	0,23
5	397	7,42	0,64	0,0206	0,05	7,49	59,39	59,52	-0,07	-0,13

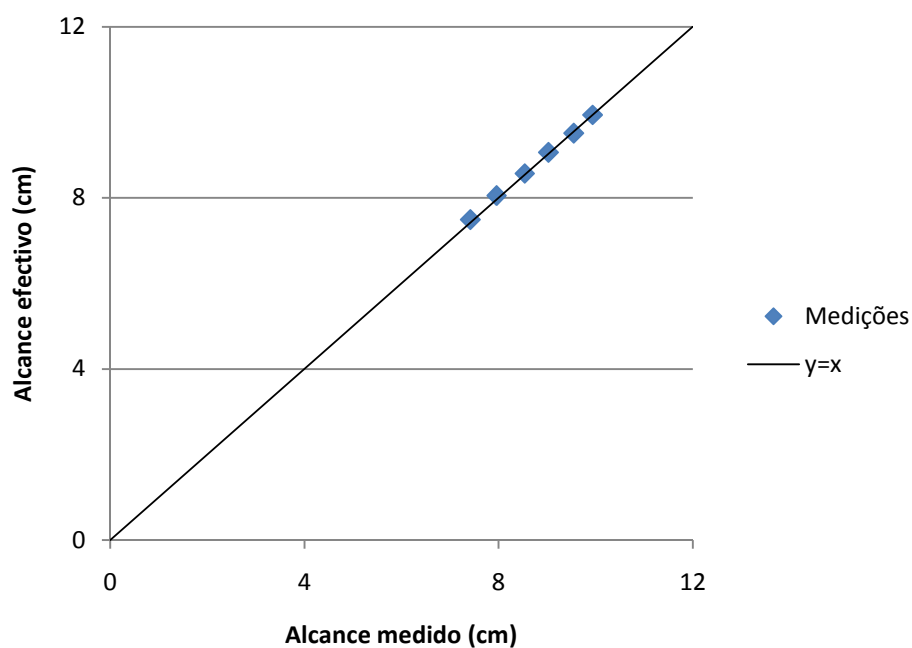


Figura II.15. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

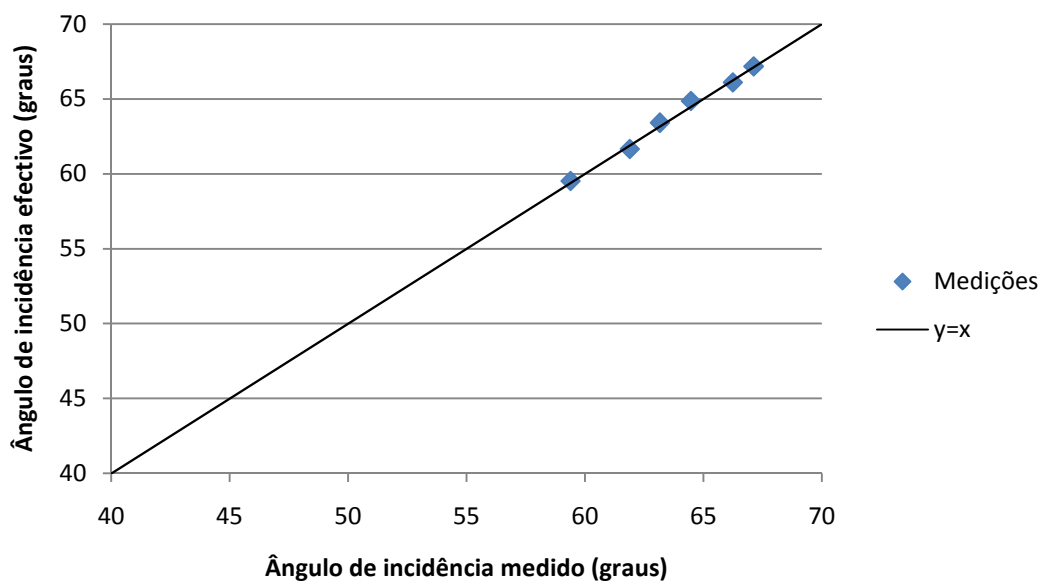


Figura II.16. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,51$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

Quadro II.9. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,71$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	782	14,62	0,88	0,0395	0,10	14,62	60,43	60,00	0,00	0,43
1	750	14,02	0,88	0,0395	0,09	14,03	58,50	58,74	-0,01	-0,24
2	719	13,44	0,88	0,0395	0,08	13,40	57,31	57,30	0,04	0,01
3	681	12,73	0,88	0,0395	0,07	12,74	55,57	55,65	-0,01	-0,08
4	644	12,04	0,88	0,0395	0,06	12,03	53,82	53,70	0,01	0,12
5	604	11,29	0,88	0,0395	0,05	11,27	51,71	51,38	0,02	0,33

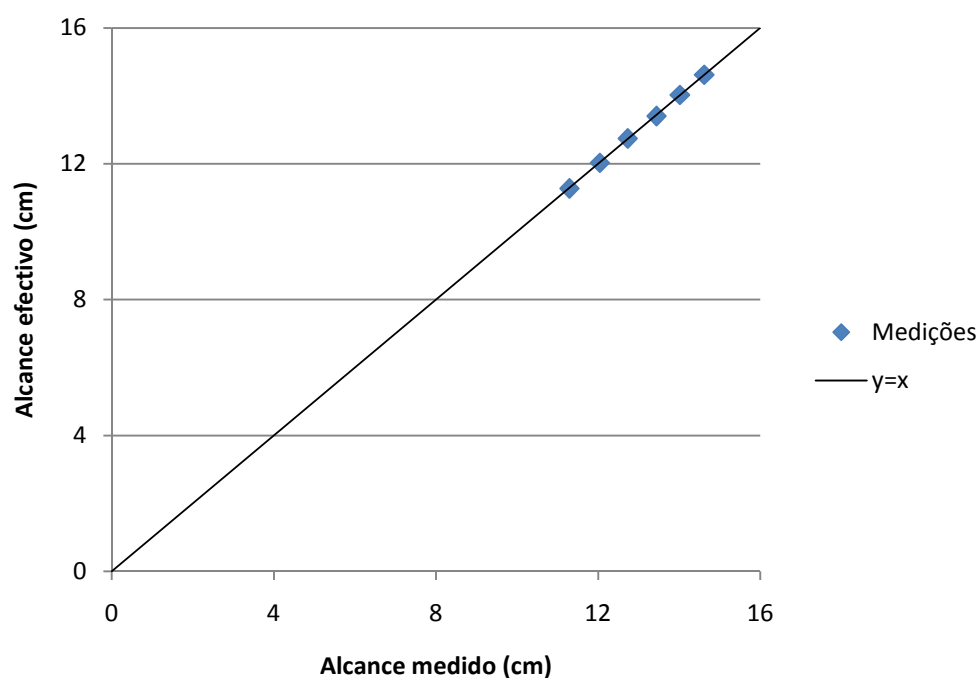


Figura II.17. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,71$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

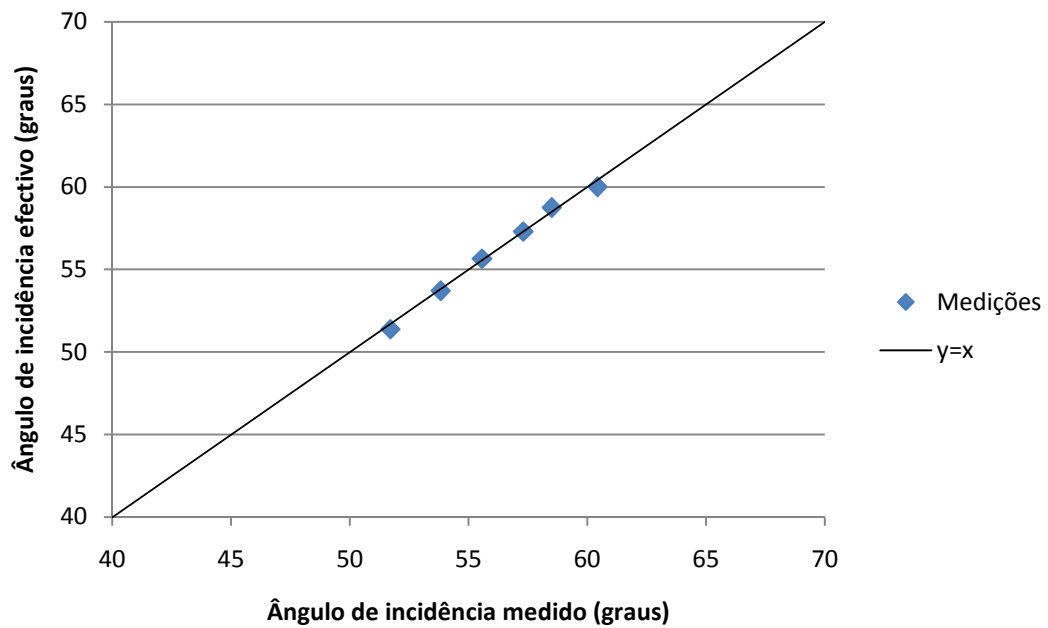


Figura II.18. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,71$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

Quadro II.10. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,85$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	909	16,99	1,00	0,0505	0,10	16,99	56,73	57,02	0,00	-0,29
1	876	16,37	1,00	0,0505	0,09	16,33	55,55	55,71	0,05	-0,16
2	831	15,53	1,00	0,0505	0,08	15,63	54,02	54,23	-0,09	-0,21
3	792	14,80	1,00	0,0505	0,07	14,88	52,52	52,53	-0,08	-0,01
4	753	14,07	1,00	0,0505	0,06	14,09	50,38	50,56	-0,01	-0,18
5	705	13,18	1,00	0,0505	0,05	13,23	48,11	48,23	-0,05	-0,12

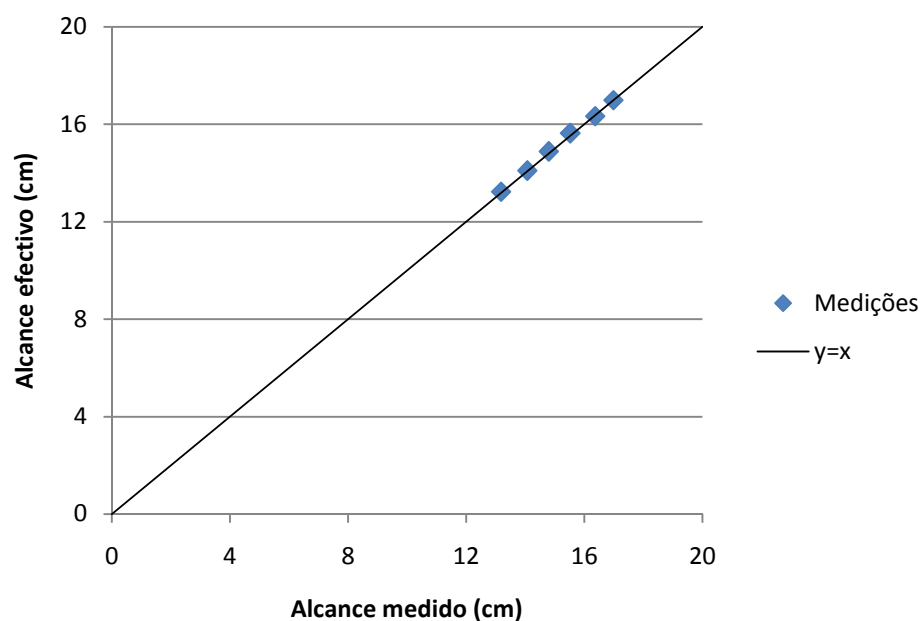


Figura II.19. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,85$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

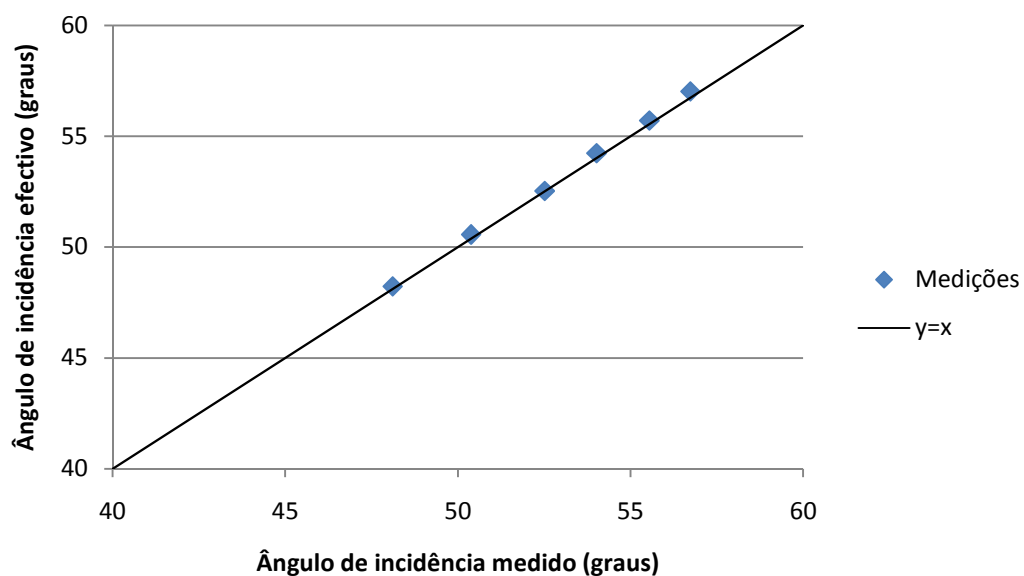
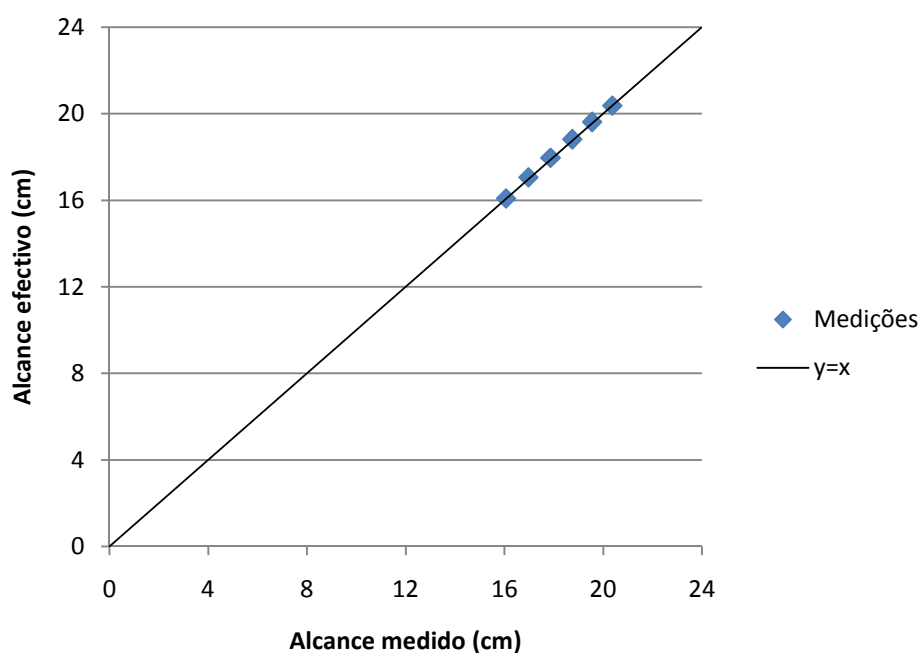


Figura II.20. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,85$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

Quadro II.11. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=0,99$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1090	20,37	1,15	0,0675	0,10	20,37	53,51	53,38	0,00	0,13
1	1046	19,55	1,15	0,0675	0,09	19,61	52,19	52,04	-0,06	0,15
2	1003	18,75	1,15	0,0675	0,08	18,81	50,52	50,53	-0,06	-0,01
3	956	17,87	1,15	0,0675	0,07	17,96	48,62	48,83	-0,09	-0,21
4	908	16,97	1,15	0,0675	0,06	17,06	46,97	46,87	-0,09	0,10
5	859	16,06	1,15	0,0675	0,05	16,08	44,46	44,59	-0,03	-0,13

Figura II.21. – Representação gráfica da comparação dos alcances efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,99$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

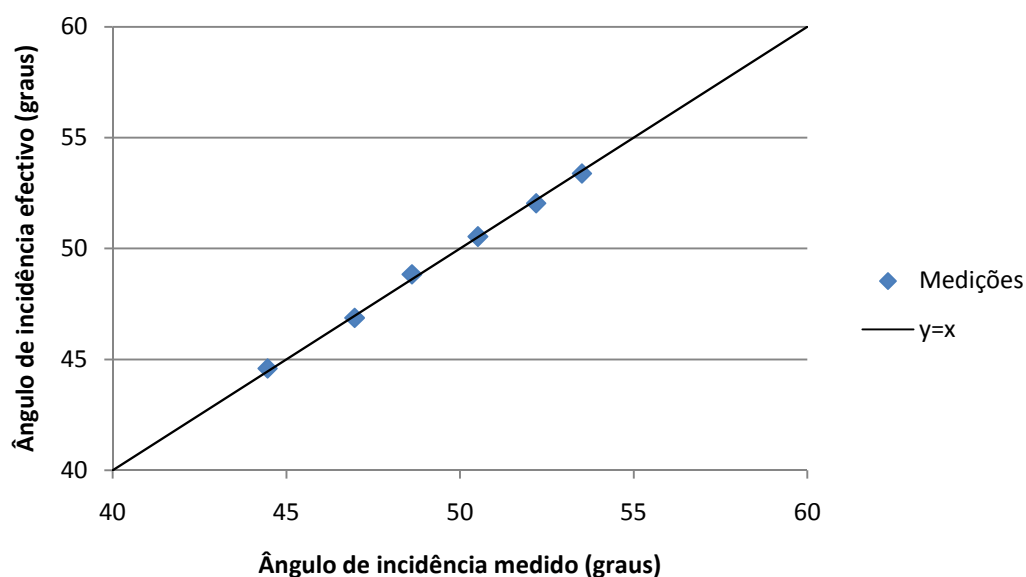


Figura II.22. - Representação gráfica da comparação dos ângulos de incidência efectivos com os obtidos pela T.A.I. para $Q=0,99$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

Quadro II.12. – Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,27$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1343	25,10	1,35	0,0933	0,10	25,11	49,44	49,25	-0,01	0,19
1	1298	24,26	1,35	0,0933	0,09	24,23	47,59	47,91	0,03	-0,32
2	1244	23,25	1,35	0,0933	0,08	23,30	46,07	46,42	-0,05	-0,35
3	1195	22,34	1,35	0,0933	0,07	22,32	44,56	44,75	0,02	-0,19
4	1136	21,23	1,35	0,0933	0,06	21,28	42,48	42,86	-0,04	-0,38
5	1075	20,09	1,35	0,0933	0,05	20,16	40,60	40,70	-0,07	-0,10

Nota: A representação gráfica dos alcances e ângulos de incidência efectivos após correcção de velocidades são, para este caso, iguais às das figuras II.9. e II.10.

Quadro II.13. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=1,77$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1549	28,95	1,51	0,1156	0,10	28,96	46,45	46,52	0,00	-0,07
1	1495	27,94	1,51	0,1156	0,09	27,99	44,83	45,20	-0,04	-0,37
2	1442	26,95	1,51	0,1156	0,08	26,97	43,73	43,75	-0,01	-0,02
3	1383	25,85	1,51	0,1156	0,07	25,89	41,77	42,13	-0,04	-0,36
4	1322	24,71	1,51	0,1156	0,06	24,75	40,64	40,32	-0,04	0,32
5	1258	23,51	1,51	0,1156	0,05	23,53	38,13	38,27	-0,02	-0,14

Nota: A representação gráfica dos alcances e ângulos de incidência efectivos após correcção de velocidades são, para este caso, iguais às das figuras II.11. e II.12.

Quadro II.14. - Comparação de valores dos alcances efectivos e ângulos de incidência efectivos com os medidos pela T.A.I. para $Q=2,40$ l/s e diferentes valores do colchão de água após correcção de velocidades

h (cm)	L_{medido} (pixel)	L_{medido} (cm)	U_0 (m/s)	H_0 (m)	H_1 (m)	L_t (cm)	θ' (graus)	θ'_t (graus)	ΔL (cm)	$\Delta\theta'$ (graus)
0	1750	32,71	1,65	0,1385	0,10	32,74	44,35	44,27	-0,03	0,08
1	1694	31,66	1,65	0,1385	0,09	31,70	43,00	42,98	-0,03	0,02
2	1636	30,58	1,65	0,1385	0,08	30,60	41,39	41,57	-0,02	-0,18
3	1574	29,42	1,65	0,1385	0,07	29,44	39,68	40,02	-0,02	-0,34
4	1506	28,15	1,65	0,1385	0,06	28,21	38,53	38,29	-0,06	0,24
5	1438	26,88	1,65	0,1385	0,05	26,90	36,22	36,34	-0,02	-0,12

Nota: A representação gráfica dos alcances e ângulos de incidência efectivos após correcção de velocidades são, para este caso, iguais às das figuras II.13 e II.14.

Quadro II.15. - Coordenadas da trajectória do jacto para $Q=0,51$ l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s)	0,51
x (cm)	y (cm)
0,00	0,00
0,50	0,15
1,00	0,23
1,50	0,24
2,00	0,18
2,50	0,05
3,00	-0,15
3,50	-0,41
4,00	-0,75
4,50	-1,15
5,00	-1,62
5,50	-2,16
6,00	-2,77
6,50	-3,45
7,00	-4,20
7,50	-5,02
8,00	-5,90
8,50	-6,86
9,00	-7,88
9,50	-8,97
10,00	-10,13

Quadro II.16. - Coordenadas da trajectória do jacto para $Q=0,71$ l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s)	0,71
x (cm)	y (cm)
0,00	0,00
0,50	0,16
1,00	0,29
1,50	0,38
2,00	0,44
2,50	0,46
3,00	0,45
3,50	0,40
4,00	0,31
4,50	0,19
5,00	0,03
5,50	-0,17
6,00	-0,40
6,50	-0,66
7,00	-0,97
7,50	-1,30
8,00	-1,68
8,50	-2,09
9,00	-2,53
9,50	-3,01
10,00	-3,53
10,50	-4,08
11,00	-4,67
11,50	-5,30
12,00	-5,96
12,50	-6,65
13,00	-7,39
13,50	-8,15
14,00	-8,96
14,50	-9,80
15,00	-10,67

Quadro II.17. - Coordenadas da trajectória do jacto para $Q=0,85$ l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s)	0,85
x (cm)	y (cm)
0,00	0,00
0,50	0,17
1,00	0,31
1,50	0,42
2,00	0,50
2,50	0,56
3,00	0,59
3,50	0,59
4,00	0,56
4,50	0,50
5,00	0,42
5,50	0,31
6,00	0,17
6,50	0,00
7,00	-0,20
7,50	-0,42
8,00	-0,68
8,50	-0,96
9,00	-1,27
9,50	-1,60
10,00	-1,97
10,50	-2,36
11,00	-2,78
11,50	-3,23
12,00	-3,71
12,50	-4,21
13,00	-4,74
13,50	-5,30
14,00	-5,89
14,50	-6,51
15,00	-7,15
15,50	-7,83
16,00	-8,53
16,50	-9,26
17,00	-10,01

Quadro II.18. - Coordenadas da trajectória do jacto para $Q=0,99$ l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s)	0,99	Caudal (l/s)	0,99
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
0,00	0,00	18,50	-7,63
0,50	0,17	19,00	-8,23
1,00	0,32	19,50	-8,86
1,50	0,45	20,00	-9,50
2,00	0,56	20,50	-10,17
2,50	0,65		
3,00	0,71		
3,50	0,76		
4,00	0,78		
4,50	0,79		
5,00	0,77		
5,50	0,73		
6,00	0,67		
6,50	0,59		
7,00	0,49		
7,50	0,37		
8,00	0,23		
8,50	0,06		
9,00	-0,12		
9,50	-0,33		
10,00	-0,56		
10,50	-0,80		
11,00	-1,07		
11,50	-1,36		
12,00	-1,67		
12,50	-2,01		
13,00	-2,36		
13,50	-2,73		
14,00	-3,13		
14,50	-3,54		
15,00	-3,98		
15,50	-4,44		
16,00	-4,92		
16,50	-5,42		
17,00	-5,94		
17,50	-6,48		
18,00	-7,04		

Quadro II.19. - Coordenadas da trajectória do jacto para Q=1,27 l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s) 1,27		Caudal (l/s) 1,27	
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
0,00	0,00	18,50	-3,66
0,50	0,17	19,00	-4,04
1,00	0,33	19,50	-4,45
1,50	0,48	20,00	-4,86
2,00	0,61	20,50	-5,30
2,50	0,72	21,00	-5,74
3,00	0,82	21,50	-6,21
3,50	0,90	22,00	-6,69
4,00	0,97	22,50	-7,18
4,50	1,02	23,00	-7,69
5,00	1,06	23,50	-8,21
5,50	1,08	24,00	-8,75
6,00	1,09	24,50	-9,30
6,50	1,08	25,00	-9,87
7,00	1,06	25,50	-10,46
7,50	1,02		
8,00	0,97		
8,50	0,90		
9,00	0,82		
9,50	0,72		
10,00	0,60		
10,50	0,47		
11,00	0,33		
11,50	0,17		
12,00	0,00		
12,50	-0,19		
13,00	-0,40		
13,50	-0,62		
14,00	-0,85		
14,50	-1,10		
15,00	-1,37		
15,50	-1,65		
16,00	-1,95		
16,50	-2,26		
17,00	-2,59		
17,50	-2,93		
18,00	-3,28		

Quadro II.20. - Coordenadas da trajectória do jacto para $Q=1,77$ l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s) 1,77		Caudal (l/s) 1,77	
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
0,00	0,00	18,50	-1,65
0,50	0,18	19,00	-1,93
1,00	0,34	19,50	-2,22
1,50	0,49	20,00	-2,52
2,00	0,63	20,50	-2,83
2,50	0,76	21,00	-3,16
3,00	0,87	21,50	-3,50
3,50	0,97	22,00	-3,85
4,00	1,06	22,50	-4,21
4,50	1,14	23,00	-4,59
5,00	1,21	23,50	-4,97
5,50	1,26	24,00	-5,37
6,00	1,30	24,50	-5,79
6,50	1,33	25,00	-6,21
7,00	1,35	25,50	-6,65
7,50	1,35	26,00	-7,10
8,00	1,34	26,50	-7,56
8,50	1,32	27,00	-8,03
9,00	1,29	27,50	-8,52
9,50	1,25	28,00	-9,01
10,00	1,19	28,50	-9,52
10,50	1,12	29,00	-10,05
11,00	1,04		
11,50	0,95		
12,00	0,84		
12,50	0,72		
13,00	0,59		
13,50	0,45		
14,00	0,29		
14,50	0,13		
15,00	-0,05		
15,50	-0,24		
16,00	-0,45		
16,50	-0,66		
17,00	-0,89		
17,50	-1,13		
18,00	-1,39		

Quadro II.21. - Coordenadas da trajectória do jacto para Q=2,40 l/s (depois da correcção de velocidades)

Caudal (l/s) 2,40		Caudal (l/s) 2,40	
x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
0,00	0,00	18,50	-0,26
0,50	0,18	19,00	-0,46
1,00	0,34	19,50	-0,68
1,50	0,50	20,00	-0,90
2,00	0,65	20,50	-1,13
2,50	0,78	21,00	-1,37
3,00	0,91	21,50	-1,62
3,50	1,02	22,00	-1,89
4,00	1,13	22,50	-2,16
4,50	1,22	23,00	-2,44
5,00	1,31	23,50	-2,74
5,50	1,38	24,00	-3,04
6,00	1,45	24,50	-3,35
6,50	1,50	25,00	-3,68
7,00	1,55	25,50	-4,01
7,50	1,58	26,00	-4,36
8,00	1,60	26,50	-4,71
8,50	1,62	27,00	-5,08
9,00	1,62	27,50	-5,45
9,50	1,61	28,00	-5,84
10,00	1,60	28,50	-6,23
10,50	1,57	29,00	-6,64
11,00	1,53	29,50	-7,05
11,50	1,48	30,00	-7,48
12,00	1,42	30,50	-7,92
12,50	1,36	31,00	-8,36
13,00	1,28	31,50	-8,82
13,50	1,19	32,00	-9,29
14,00	1,09	32,50	-9,76
14,50	0,98	33,00	-10,25
15,00	0,86		
15,50	0,73		
16,00	0,59		
16,50	0,44		
17,00	0,28		
17,50	0,11		
18,00	-0,07		

Anexo III

PRESSÕES MÉDIAS

Quadro III.1. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,51	0,99
S1	0,51	0,65
S2	0,51	1,65
S3	0,51	1,18
S4	0,51	-0,25
S5	0,51	0,41
S6	0,51	1,05
S7	0,51	0,86
S8	0,51	0,94

Quadro III.2. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,51	2,03
S1	0,51	1,86
S2	0,51	2,37
S3	0,51	2,12
S4	0,51	1,83
S5	0,51	1,93
S6	0,51	1,97
S7	0,51	1,98
S8	0,51	2,01

Quadro III.3. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,51	3,01
S1	0,51	2,94
S2	0,51	3,24
S3	0,51	3,23
S4	0,51	2,85
S5	0,51	2,92
S6	0,51	2,96
S7	0,51	3,00
S8	0,51	3,02

Quadro III.4. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 4$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,51	4,01
S1	0,51	4,02
S2	0,51	4,17
S3	0,51	4,15
S4	0,51	3,95
S5	0,51	4,00
S6	0,51	4,01
S7	0,51	4,06
S8	0,51	4,06

Quadro III.5. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 5$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,51	5,01
S1	0,51	4,98
S2	0,51	5,12
S3	0,51	5,11
S4	0,51	4,93
S5	0,51	4,93
S6	0,51	4,94
S7	0,51	4,96
S8	0,51	4,98

Quadro III.6. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,85	0,97
S1	0,85	0,58
S2	0,85	2,74
S3	0,85	0,42
S4	0,85	-0,47
S5	0,85	-0,32
S6	0,85	-0,39
S7	0,85	0,64
S8	0,85	1,08

Quadro III.7. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,85	2,05
S1	0,85	1,60
S2	0,85	2,99
S3	0,85	0,86
S4	0,85	1,02
S5	0,85	1,96
S6	0,85	1,80
S7	0,85	1,59
S8	0,84	1,85

Quadro III.8. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,85	3,04
S1	0,85	2,86
S2	0,85	3,79
S3	0,85	2,94
S4	0,85	2,72
S5	0,85	2,93
S6	0,85	3,00
S7	0,85	2,98
S8	0,86	3,09

Quadro III.9. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 4$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,84	4,02
S1	0,85	3,91
S2	0,84	4,66
S3	0,85	4,15
S4	0,85	3,86
S5	0,84	4,01
S6	0,85	4,05
S7	0,85	3,99
S8	0,85	4,01

Quadro III.10. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 5$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,85	4,90
S1	0,84	4,93
S2	0,85	5,42
S3	0,85	5,07
S4	0,84	4,84
S5	0,84	4,97
S6	0,84	4,93
S7	0,84	4,95
S8	0,84	4,95

Quadro III.11. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,99$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,98	1,07
S1	0,98	0,39
S2	0,99	2,93
S3	0,98	1,09
S4	0,99	-0,25

Quadro III.12. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,99$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,99	2,07
S1	1,00	1,93
S2	1,00	3,18
S3	0,99	1,24
S4	0,99	0,40

Quadro III.13. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=0,99$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,98	3,04
S1	0,98	2,99
S2	0,98	3,81
S3	0,98	2,57
S4	0,99	2,65

Quadro III.14. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,99$ l/s e $h \approx 4$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	0,99	4,03
S1	0,99	3,94
S2	0,99	4,64
S3	0,99	4,03
S4	0,99	3,64

Quadro III.15. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=0,99$ l/s e $h \approx 5$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,00	4,96
S1	0,99	4,91
S2	0,99	5,39
S3	1,00	5,11
S4	1,00	4,69

Quadro III.16. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=1,27$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,28	1,03
S1	1,26	2,25
S2	1,26	4,69
S3	1,25	2,36
S4	1,27	0,66

Quadro III.17. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=1,27$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,24	2,10
S1	1,26	2,08
S2	1,26	3,58
S3	1,28	2,33
S4	1,26	0,78

Quadro III.18. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=1,27$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,30	3,01
S1	1,30	2,88
S2	1,28	3,84
S3	1,27	2,88
S4	1,26	2,20

Quadro III.19. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=1,27$ l/s e $h \approx 4$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,28	3,95
S1	1,27	3,79
S2	1,26	4,41
S3	1,28	4,08
S4	1,27	3,75

Quadro III.20. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=1,27$ l/s e $h \approx 5$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,29	4,96
S1	1,26	4,86
S2	1,28	5,32
S3	1,28	5,24
S4	1,28	4,93

Quadro III.21. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,77	1,03
S1	1,78	0,95
S2	1,77	4,48
S3	1,79	2,33
S4	1,78	0,66

Quadro III.22. - Ensaios de determinação de pressões médias para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,78	1,98
S1	1,77	1,94
S2	1,77	4,41
S3	1,78	2,42
S4	1,77	0,85

Quadro III.23. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,78	2,99
S1	1,74	2,98
S2	1,74	4,47
S3	1,75	2,91
S4	1,75	2,33

Quadro III.24. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 4$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,75	3,98
S1	1,75	3,81
S2	1,75	4,76
S3	1,75	4,25
S4	1,75	4,07

Quadro III.25. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 5$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	1,78	5,03
S1	1,79	4,91
S2	1,79	5,61
S3	1,79	5,52
S4	1,79	5,17

Quadro III.26. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=2,40$ l/s e $h \approx 1$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	2,41	1,01
S1	2,40	2,22
S2	2,39	6,10
S3	2,40	1,72
S4	2,40	0,25

Quadro III.27. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=2,40$ l/s e $h \approx 2$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	2,39	2,04
S1	2,34	2,80
S2	2,37	5,35
S3	2,38	1,69
S4	2,38	0,34

Quadro III.28. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=2,40$ l/s e $h \approx 3$ cm

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	2,38	2,99
S1	2,43	3,38
S2	2,42	5,61
S3	2,34	2,60
S4	2,42	2,28

Quadro III.29. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=2,40\text{ l/s}$ e $h\approx 4\text{ cm}$

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	2,41	4,03
S1	2,40	4,08
S2	2,40	5,63
S3	2,47	4,51
S4	2,48	4,03

Quadro III.30. - Ensaio de determinação de pressões médias para $Q=2,40\text{ l/s}$ e $h\approx 5\text{ cm}$

Tomada de Pressão	Q (l/s)	Pressão (cm.c.a.)
Tomada de Pressão Estática	2,40	5,06
S1	2,39	5,00
S2	2,39	6,07
S3	2,39	5,74
S4	2,38	5,03

Anexo IV

FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

Quadro IV.1. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 1$ cm

Colchão 1 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	7,51	7,77	5,57	1,87	1,34	0,51	0,12	0,09
Máximo (cm.c.a.)	227,90	92,46	104,94	98,16	22,66	12,08	0,66	5,67
Mínimo (cm.c.a.)	-51,48	-118,85	-132,38	-63,69	-6,08	-17,23	-0,42	-4,81

Quadro IV.2. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 2$ cm

Colchão 2 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	5,62	7,68	5,26	3,73	1,72	0,61	0,12	0,08
Máximo (cm.c.a.)	116,15	87,62	90,96	68,58	13,26	6,43	0,39	4,06
Mínimo (cm.c.a.)	-40,47	-158,64	-116,25	-29,28	-8,50	-10,24	-0,15	-3,20

Quadro IV.3. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 3$ cm

Colchão 3 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	4,26	7,12	5,73	2,83	0,87	0,45	0,12	0,05
Máximo (cm.c.a.)	82,84	111,28	60,86	34,17	4,93	2,13	0,39	2,71
Mínimo (cm.c.a.)	-36,97	-170,74	-175,38	-18,53	-5,54	-1,90	-0,15	-2,39

Quadro IV.4. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 4$ cm

Colchão 4 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	3,20	5,10	3,59	2,00	0,46	0,39	0,12	0,04
Máximo (cm.c.a.)	38,24	56,70	24,85	32,83	2,51	2,13	0,39	1,91
Mínimo (cm.c.a.)	-18,44	-113,21	-85,88	-13,69	-3,39	-1,37	-0,15	-1,32

Quadro IV.5. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h\approx 5$ cm

Colchão 5 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	2,26	3,03	2,08	1,36	0,76	0,38	0,12	0,03
Máximo (cm.c.a.)	22,12	30,09	14,90	16,43	1,71	1,59	0,39	1,37
Mínimo (cm.c.a.)	-12,80	-50,57	-23,80	-11,00	-1,25	-0,83	-0,15	-1,05

Quadro IV.6. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,85$ l/s e $h\approx 1$ cm

Colchão 1 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	16,44	12,48	10,30	7,05	5,35	1,17	0,85	0,15
Máximo (cm.c.a.)	173,10	64,50	57,63	63,48	51,14	34,12	8,99	9,43
Mínimo (cm.c.a.)	-68,94	-111,86	-95,56	-89,77	-23,00	-25,03	-13,05	-6,43

Quadro IV.7. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,85$ l/s e $h\approx 2$ cm

Colchão 2 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	14,42	11,19	9,39	7,94	5,48	3,59	1,66	0,24
Máximo (cm.c.a.)	173,10	188,98	110,85	95,47	62,96	10,19	3,61	6,48
Mínimo (cm.c.a.)	-72,70	-213,76	-314,06	-51,06	-29,18	-10,24	-2,57	-8,85

Quadro IV.8. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,85$ l/s e $h\approx 3$ cm

Colchão 3 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	11,07	8,57	7,22	4,85	3,33	1,66	0,87	0,11
Máximo (cm.c.a.)	87,40	64,23	79,94	90,63	45,23	16,65	5,49	11,32
Mínimo (cm.c.a.)	-45,03	-147,08	-179,95	-46,49	-20,59	-27,18	-5,79	-11,80

Quadro IV.9. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,85$ l/s e $h\approx 4$ cm

Colchão 4 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	9,47	6,94	5,65	2,88	1,61	0,44	0,25	0,05
Máximo (cm.c.a.)	90,36	59,12	39,63	80,41	28,57	6,70	3,61	10,24
Mínimo (cm.c.a.)	-35,90	-117,78	-87,77	-23,90	-13,07	-6,47	-4,72	-6,43

Quadro IV.10. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,85$ l/s e $h\approx 5$ cm

Colchão 5 cm								
Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
R.M.S. (cm.c.a.)	7,15	4,62	3,17	2,20	1,12	0,25	0,18	0,03
Máximo (cm.c.a.)	30,18	47,56	29,15	45,46	12,99	6,16	6,84	6,48
Mínimo (cm.c.a.)	-18,17	-58,63	-81,58	-20,68	-6,89	-4,86	-8,48	-4,28

Quadro IV.11. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,99$ l/s e $h\approx 1$ cm

Colchão 1 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	22,58	7,84	5,58	4,36
Máximo (cm.c.a.)	305,80	138,70	97,41	88,48
Mínimo (cm.c.a.)	-95,27	-186,60	-210,32	-45,41

Quadro IV.12. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,99$ l/s e $h\approx 2$ cm

Colchão 2 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	23,14	7,42	4,93	4,75
Máximo (cm.c.a.)	317,08	118,81	93,92	86,87
Mínimo (cm.c.a.)	-85,86	-163,48	-157,91	-45,41

Quadro IV.13. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,99$ l/s e $h\approx 3$ cm

Colchão 3 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	17,35	6,11	2,70	6,42
Máximo (cm.c.a.)	269,53	101,33	68,38	72,89
Mínimo (cm.c.a.)	-96,07	-159,45	-111,68	-32,24

Quadro IV.14. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,99$ l/s e $h\approx 4$ cm

Colchão 4 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	12,84	5,16	4,36	5,11
Máximo (cm.c.a.)	238,10	68,27	33,45	62,13
Mínimo (cm.c.a.)	-83,72	-142,78	-71,91	-46,49

Quadro IV.15. - Valores das flutuações de pressão para $Q=0,99$ l/s e $h\approx 5$ cm

Colchão 5 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	8,88	4,02	4,45	3,78
Máximo (cm.c.a.)	126,89	61,28	26,73	58,90
Mínimo (cm.c.a.)	-51,21	-89,55	-33,48	-38,15

Quadro IV.16. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,27$ l/s e $h\approx 1$ cm

Colchão 1 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	29,26	12,71	10,41	6,12
Máximo (cm.c.a.)	347,17	176,07	172,29	80,95
Mínimo (cm.c.a.)	-116,22	-252,20	-122,04	-69,88

Quadro IV.17. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,27$ l/s e $h\approx 2$ cm

Colchão 2 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	25,70	11,43	8,89	6,46
Máximo (cm.c.a.)	341,26	118,81	69,92	95,47
Mínimo (cm.c.a.)	-80,76	-206,77	-84,66	-59,93

Quadro IV.18. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,27$ l/s e $h\approx 3$ cm

Colchão 3 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	21,71	9,58	8,12	6,92
Máximo (cm.c.a.)	248,58	112,63	87,54	59,98
Mínimo (cm.c.a.)	-74,04	-196,55	-108,72	-47,29

Quadro IV.19. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,27$ l/s e $h\approx 4$ cm

Colchão 4 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	19,46	9,00	7,61	7,29
Máximo (cm.c.a.)	231,93	129,56	87,60	75,57
Mínimo (cm.c.a.)	-86,13	-220,21	-114,01	-34,39

Quadro IV.20. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,27$ l/s e $h\approx 5$ cm

Colchão 5 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	15,53	7,26	6,71	5,76
Máximo (cm.c.a.)	193,78	93,54	73,38	56,22
Mínimo (cm.c.a.)	-78,34	-164,83	-62,06	-25,52

Quadro IV.21. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 1$ cm

Colchão 1 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	34,15	15,14	9,89	6,57
Máximo (cm.c.a.)	356,84	216,13	130,17	78,26
Mínimo (cm.c.a.)	-110,04	-334,47	-198,73	-44,07

Quadro IV.22. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 2$ cm

Colchão 2 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	29,33	14,01	8,73	6,17
Máximo (cm.c.a.)	294,52	130,64	108,71	99,77
Mínimo (cm.c.a.)	-92,04	-278,82	-140,90	-56,17

Quadro IV.23. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 3$ cm

Colchão 3 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	22,37	12,13	8,73	5,65
Máximo (cm.c.a.)	259,33	114,51	85,54	71,81
Mínimo (cm.c.a.)	-91,77	-240,91	-109,47	-37,62

Quadro IV.24. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,77$ l/s e $h \approx 4$ cm

Colchão 4 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	22,68	10,61	7,92	6,10
Máximo (cm.c.a.)	216,88	146,77	77,07	47,88
Mínimo (cm.c.a.)	-98,22	-244,68	-114,52	-31,70

Quadro IV.25. - Valores das flutuações de pressão para $Q=1,77$ l/s e $h\approx 5$ cm

Colchão 5 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	19,31	9,09	7,37	6,53
Máximo (cm.c.a.)	231,66	137,90	103,70	55,68
Mínimo (cm.c.a.)	-86,94	-256,50	-87,89	-27,40

Quadro IV.26. - Valores das flutuações de pressão para $Q=2,40$ l/s e $h\approx 1$ cm

Colchão 1 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	31,18	17,86	11,02	5,72
Máximo (cm.c.a.)	301,23	221,24	153,85	72,35
Mínimo (cm.c.a.)	-209,70	-347,91	-177,48	-48,37

Quadro IV.27. - Valores das flutuações de pressão para $Q=2,40$ l/s e $h\approx 2$ cm

Colchão 2 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	25,78	14,97	9,99	5,56
Máximo (cm.c.a.)	293,17	198,39	119,84	62,67
Mínimo (cm.c.a.)	-185,80	-343,07	-197,04	-38,42

Quadro IV.28. - Valores das flutuações de pressão para $Q=2,40$ l/s e $h\approx 3$ cm

Colchão 3 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	24,94	13,22	9,73	5,79
Máximo (cm.c.a.)	281,35	147,04	104,00	61,06
Mínimo (cm.c.a.)	-150,34	-244,68	-152,47	-39,50

Quadro IV.29. - Valores das flutuações de pressão para $Q=2,40$ l/s e $h \approx 4$ cm

Colchão 4 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	26,71	9,51	7,59	6,39
Máximo (cm.c.a.)	198,08	151,61	91,39	67,78
Mínimo (cm.c.a.)	-144,69	-213,49	-146,25	-33,58

Quadro IV.30. - Valores das flutuações de pressão para $Q=2,40$ l/s e $h \approx 5$ cm

Colchão 5 cm				
Parâmetro	S1	S2	S3	S4
R.M.S. (cm.c.a.)	22,85	7,75	7,06	6,80
Máximo (cm.c.a.)	214,20	139,78	123,21	58,10
Mínimo (cm.c.a.)	-126,43	-220,75	-140,34	-29,28

Anexo V

ANÁLISE COMPARATIVA PRESSÕES MÉDIAS/FLUTUAÇÕES PRESSÃO

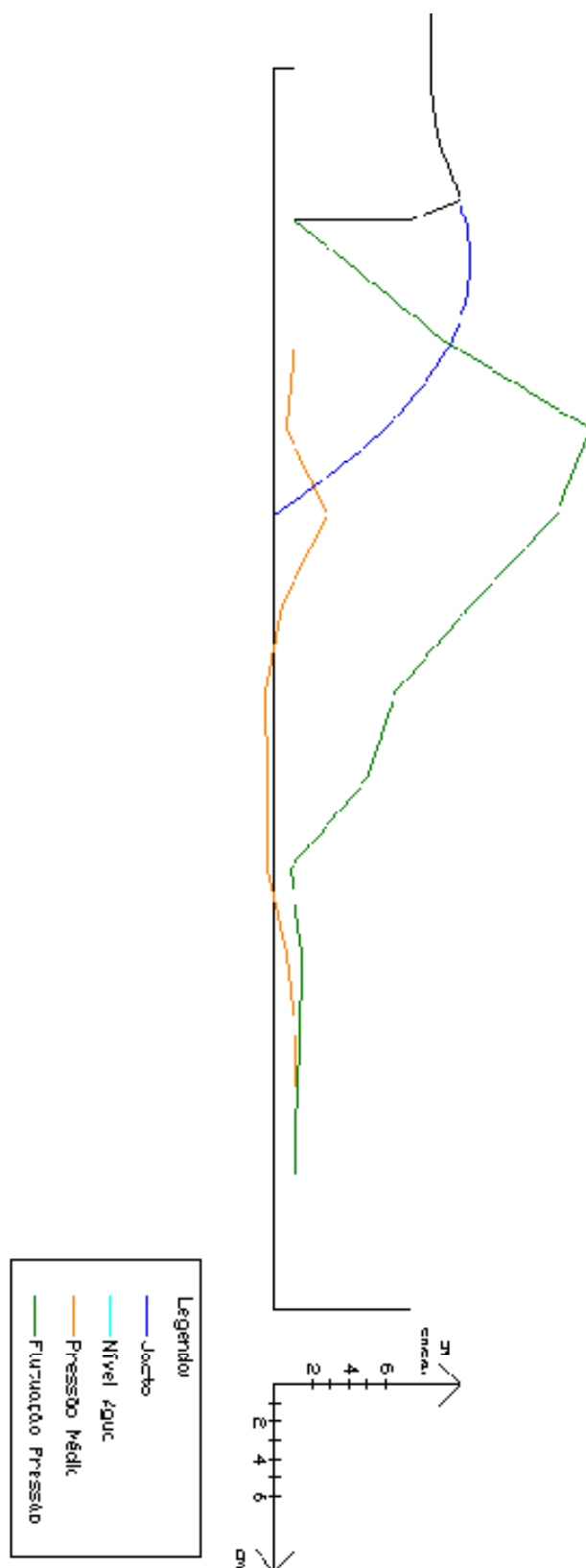


Figura V.1. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 1$ cm

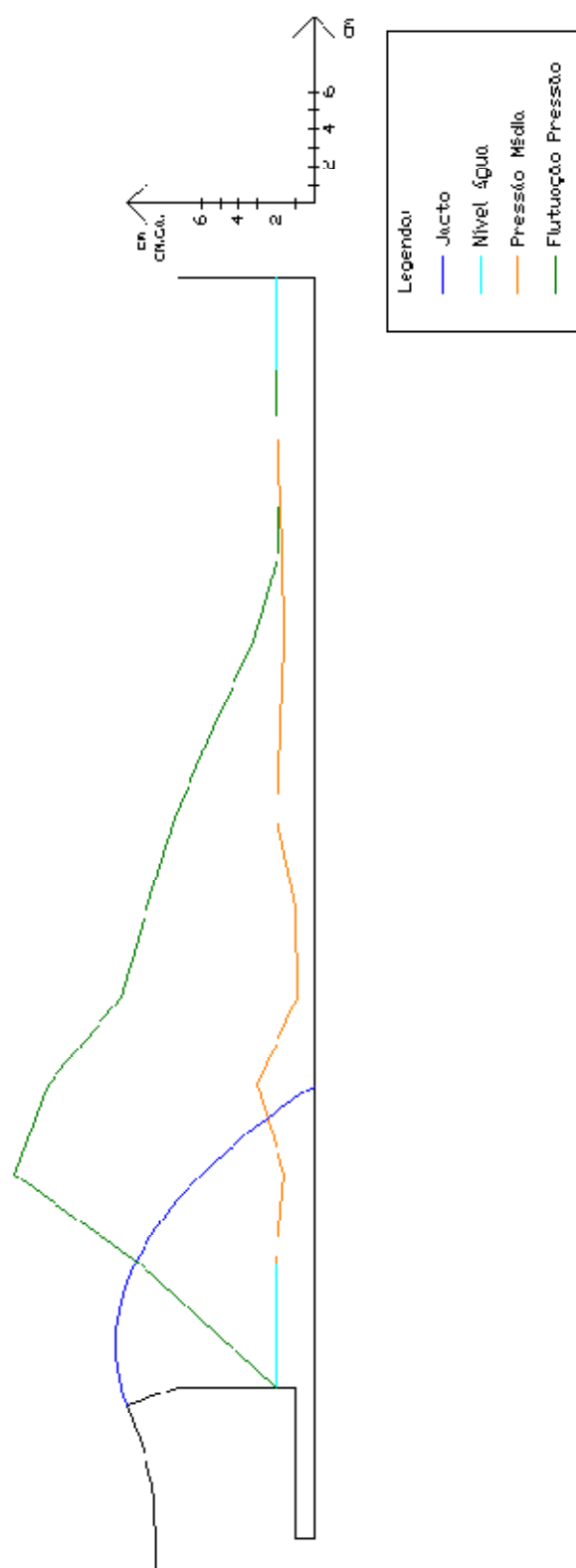


Figura V.2. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0, 0,85 \text{ l/s}$ e $h \approx 2 \text{ cm}$

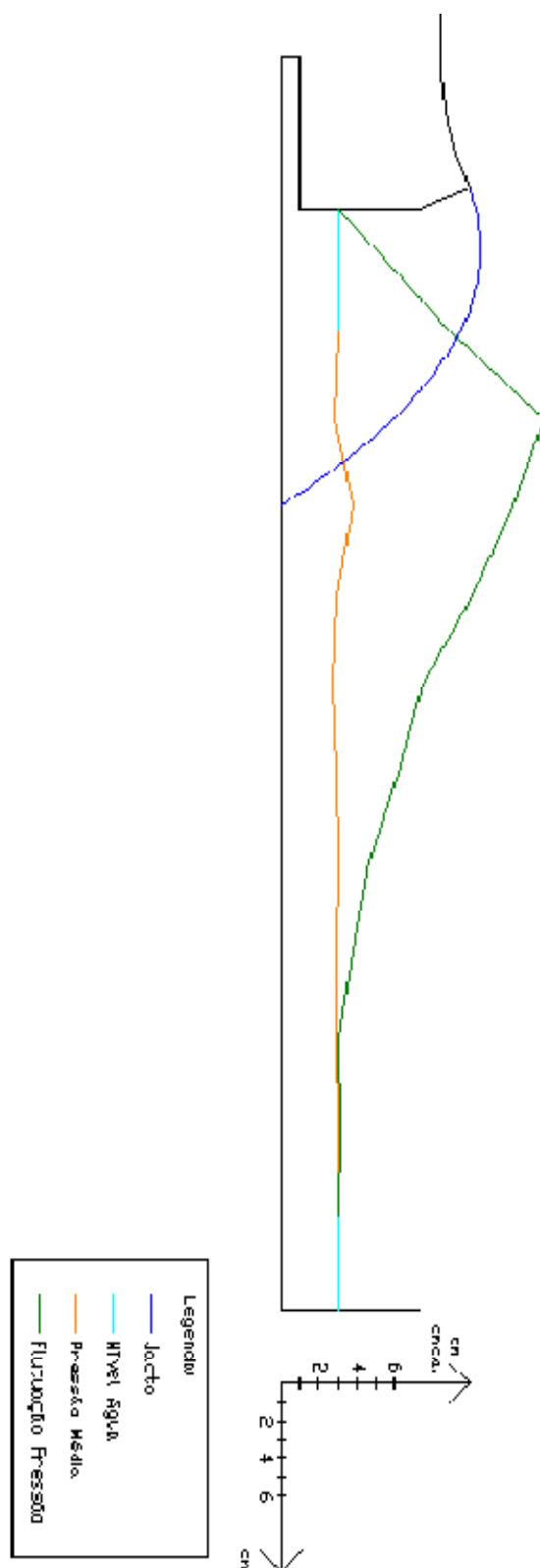


Figura V.3. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,085$ l/s e $h \approx 3$ cm

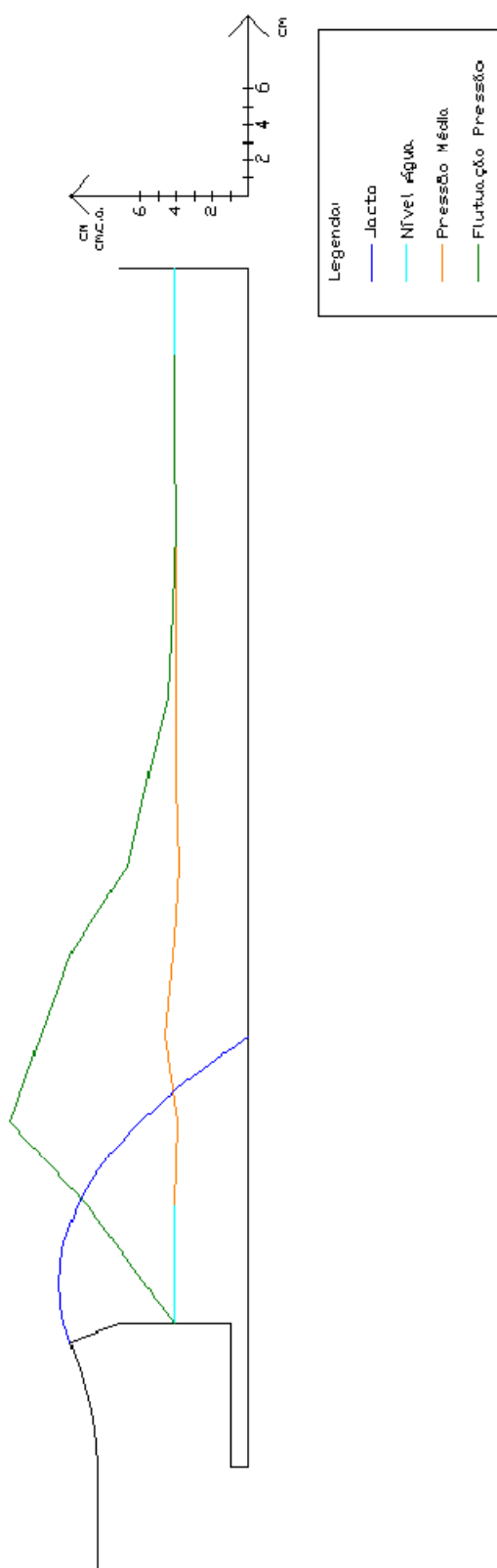


Figura V.4. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0, 0,85 \text{ l/s}$ e $h \approx 4 \text{ cm}$

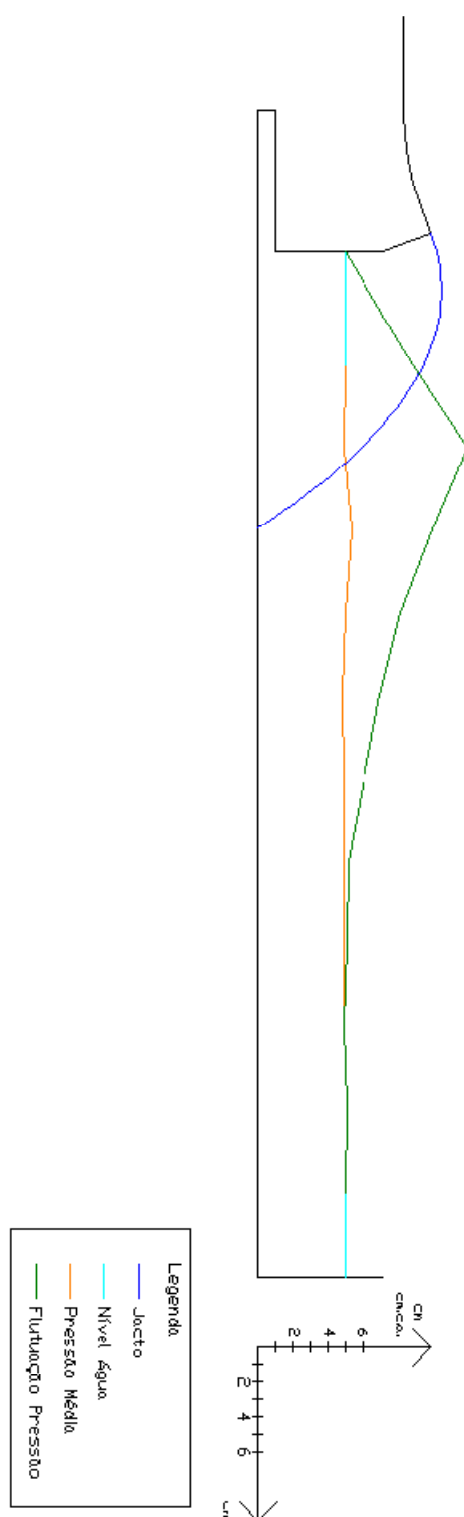


Figura V.5. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,085 \text{ l/s}$ e $h \approx 5 \text{ cm}$

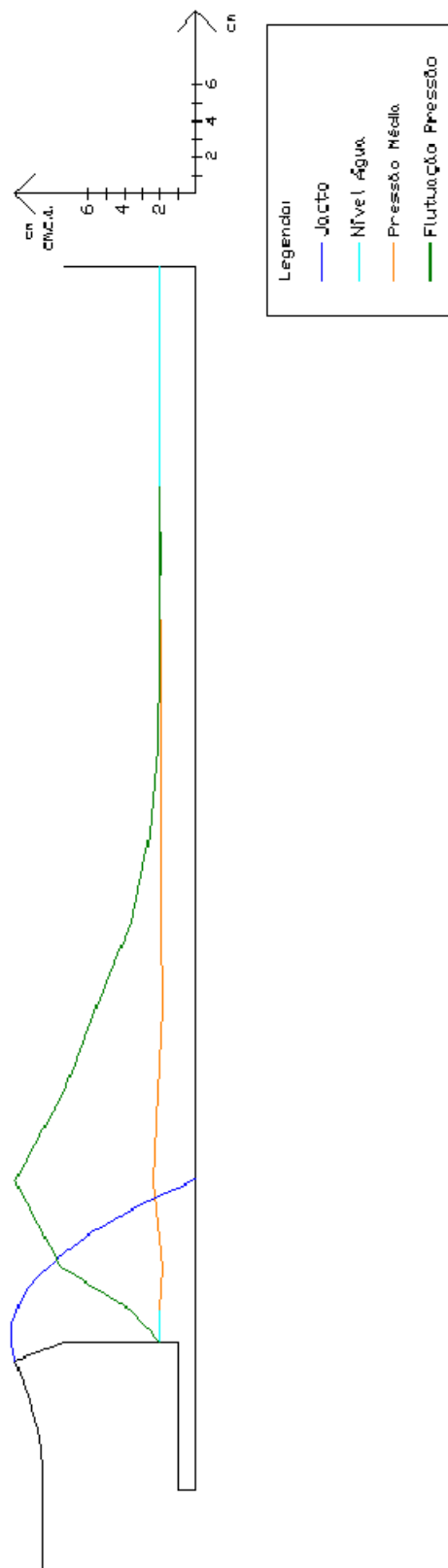


Figura V.6. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,51 \text{ l/s}$ e $h \approx 1 \text{ cm}$



Figura V.7. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 2$ cm

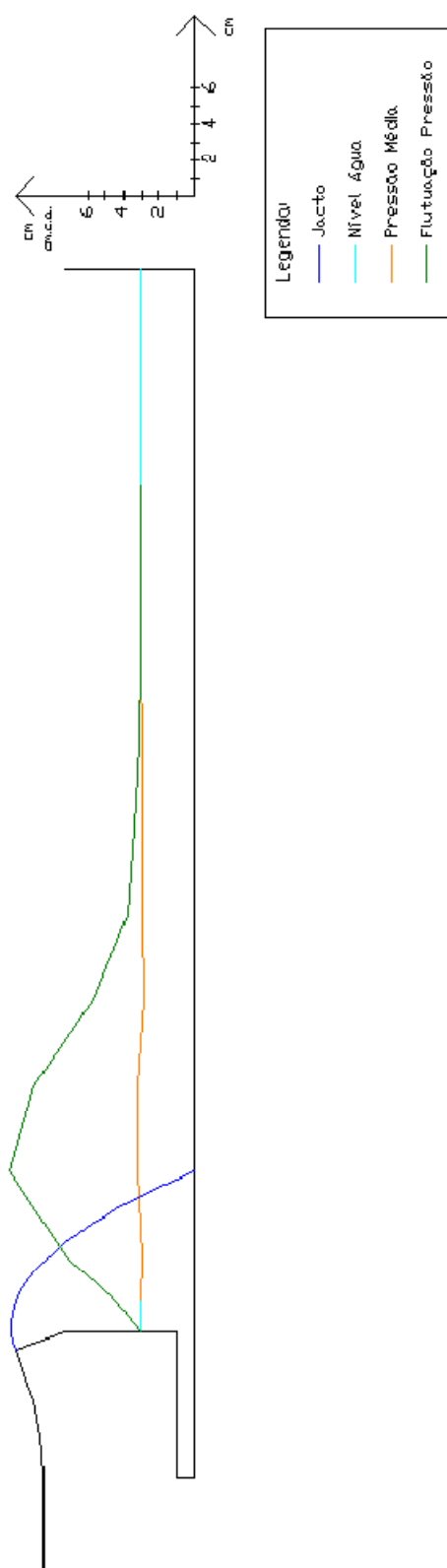


Figura V.8. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0, 51 \text{ l/s}$ e $h \approx 3 \text{ cm}$

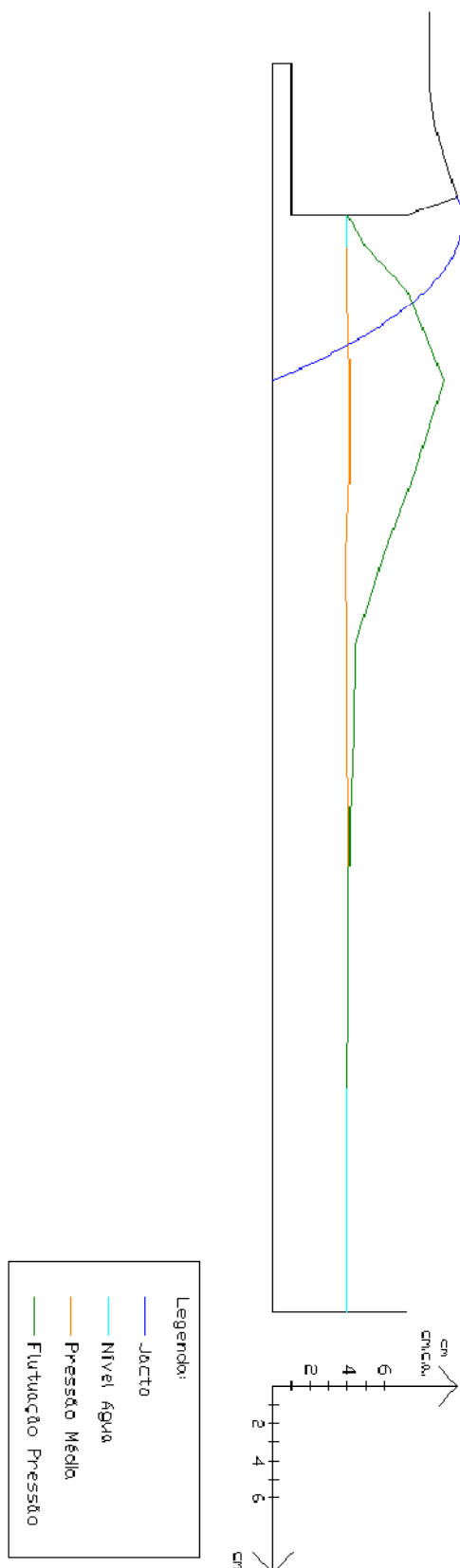


Figura V.9. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 4$ cm

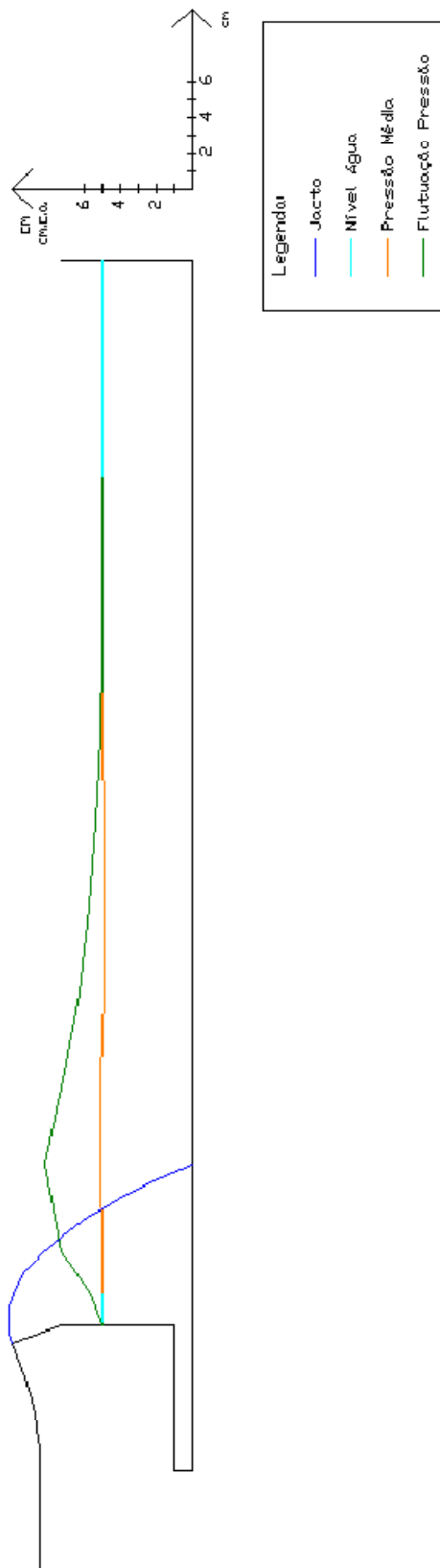


Figura V.10. - Esquema de pressões médias e flutuações de pressão para $Q=0, 51 \text{ l/s}$ e $h \approx 5 \text{ cm}$

Quadro V.1. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,51$ l/s e $h=1$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	0,65	7,51	11,53
S2	1,65	7,77	4,70
S3	1,18	5,57	4,71
S4	-0,25	1,87	-7,38
S5	0,41	1,34	3,24
S6	1,05	0,51	0,49
S7	0,86	0,12	0,14
S8	0,94	0,09	0,10

Quadro V.2. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,51$ l/s e $h=2$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	1,86	5,62	3,02
S2	2,37	7,68	3,25
S3	2,12	5,26	2,49
S4	1,83	3,73	2,04
S5	1,93	1,72	0,89
S6	1,97	0,61	0,31
S7	1,98	0,12	0,06
S8	2,01	0,08	0,04

Quadro V.3. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,51$ l/s e $h=3$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	2,94	4,26	1,45
S2	3,24	7,12	2,20
S3	3,23	5,73	1,78
S4	2,85	2,83	0,99
S5	2,92	0,87	0,30
S6	2,96	0,45	0,15
S7	3,00	0,12	0,04
S8	3,02	0,05	0,02

Quadro V.4. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,51$ l/s e $h=4$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	4,02	3,20	0,79
S2	4,17	5,10	1,22
S3	4,15	3,59	0,87
S4	3,95	2,00	0,51
S5	4,00	0,46	0,12
S6	4,01	0,39	0,10
S7	4,06	0,12	0,03
S8	4,06	0,04	0,01

Quadro V.5. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,51$ l/s e $h=5$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
1	4,98	2,26	0,45
2	5,12	3,03	0,59
3	5,11	2,08	0,41
4	4,93	1,36	0,28
5	4,93	0,76	0,15
6	4,94	0,38	0,08
7	4,96	0,12	0,02
8	4,98	0,03	0,01

Quadro V.6. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,71$ l/s e $h=1$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	0,64	13,35	20,72
S2	2,35	12,86	5,48
S3	0,72	10,57	14,73
S4	-0,54	4,85	-9,03
S5	-0,44	1,85	-4,21
S6	0,48	0,86	1,80
S7	1,15	0,50	0,43
S8	0,99	0,24	0,24

Quadro V.7. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,71$ l/s e $h=2$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	1,79	12,52	6,99
S2	2,86	11,59	4,05
S3	1,54	9,11	5,91
S4	1,71	4,64	2,72
S5	1,88	1,44	0,77
S6	1,89	0,74	0,39
S7	1,96	0,25	0,12
S8	1,98	0,16	0,08

Quadro V.8. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,71$ l/s e $h=3$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	2,85	9,81	3,44
S2	3,65	7,69	2,11
S3	3,06	5,75	1,88
S4	2,85	4,01	1,41
S5	2,86	1,20	0,42
S6	2,97	0,57	0,19
S7	3,01	0,19	0,06
S8	3,00	0,13	0,04

Quadro V.9. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,71$ l/s e $h=4$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	3,84	7,54	1,96
S2	4,40	3,85	0,88
S3	4,07	3,38	0,83
S4	3,81	2,64	0,69
S5	3,84	1,10	0,29
S6	3,89	0,46	0,12
S7	3,92	0,16	0,04
S8	3,95	0,10	0,03

Quadro V.10. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,71$ l/s e $h=5$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	4,95	3,11	0,63
S2	5,30	2,53	0,48
S3	5,19	1,98	0,38
S4	4,94	1,78	0,36
S5	4,95	0,90	0,18
S6	5,03	0,37	0,07
S7	5,03	0,14	0,03
S8	5,03	0,07	0,01

Quadro V.11. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,85$ l/s e $h=1$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	0,58	16,44	28,36
S2	2,74	12,48	4,55
S3	0,42	10,30	24,49
S4	-0,47	7,05	-15,10
S5	-0,32	5,35	-16,88
S6	-0,39	1,17	-2,97
S7	0,64	0,85	1,32
S8	1,08	0,15	0,14

Quadro V.12. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,85$ l/s e $h=2$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	1,60	14,42	9,04
S2	2,99	11,19	3,75
S3	0,86	9,39	10,99
S4	1,02	7,94	7,80
S5	1,96	5,48	2,79
S6	1,80	3,59	1,99
S7	1,59	1,66	1,04
S8	1,85	0,24	0,13

Quadro V.13. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,85$ l/s e $h=3$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	2,86	11,07	3,87
S2	3,79	8,57	2,27
S3	2,94	7,22	2,46
S4	2,72	4,85	1,78
S5	2,93	3,33	1,14
S6	3,00	1,66	0,55
S7	2,98	0,87	0,29
S8	3,09	0,11	0,03

Quadro V.14. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,85$ l/s e $h=4$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	3,91	9,47	2,42
S2	4,66	6,94	1,49
S3	4,15	5,65	1,36
S4	3,86	2,88	0,75
S5	4,01	1,61	0,40
S6	4,05	0,44	0,11
S7	3,99	0,25	0,06
S8	4,01	0,05	0,01

Quadro V.15. - Valores da razão $R.M.S./|P_{média}|$ para $Q=0,85$ l/s e $h=5$ cm

Sonda	Pressão (cm.c.a.)	R.M.S. (cm.c.a.)	$R.M.S./ P_{média} $
S1	4,93	7,15	1,45
S2	5,42	4,62	0,85
S3	5,07	3,17	0,63
S4	4,84	2,20	0,45
S5	4,97	1,12	0,22
S6	4,93	0,25	0,05
S7	4,95	0,18	0,04
S8	4,95	0,03	0,01

Anexo VI

PERFIS FOSSAS DE EROSÃO

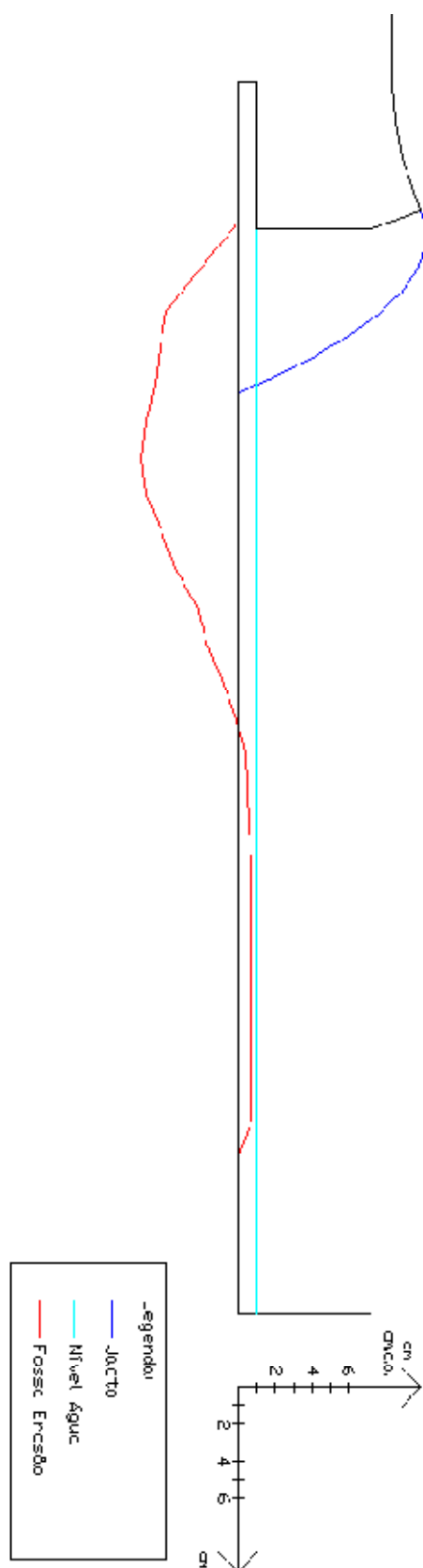


Figura VI.1. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 1$ cm

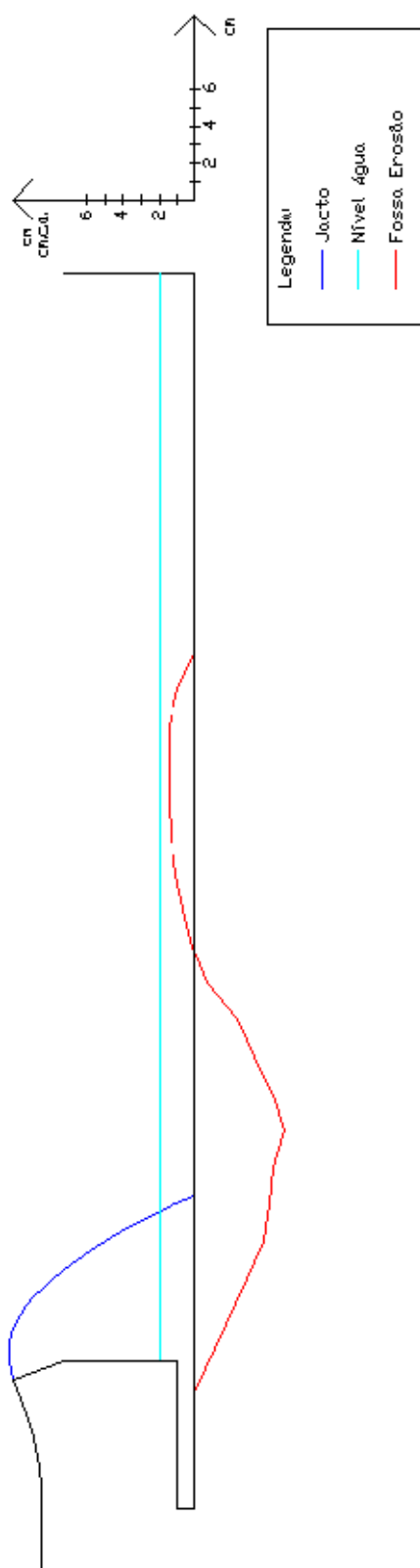


Figura VI.2. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,51 \text{ l/s}$ e $h \approx 2 \text{ cm}$

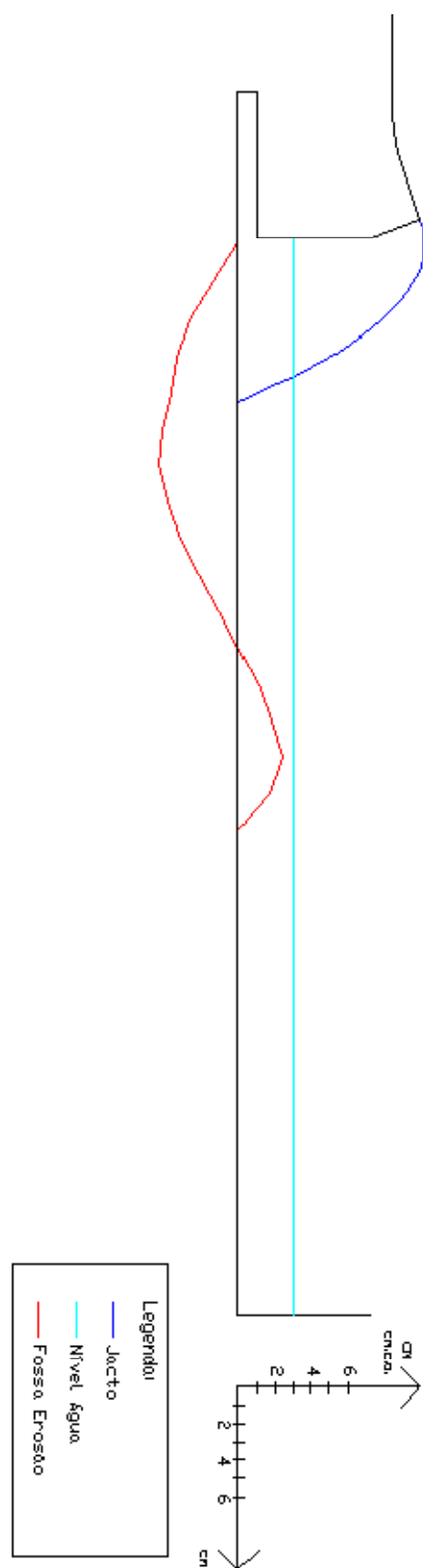


Figura VI.3. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 3$ cm



Figura VI.4. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,51 \text{ l/s}$ e $h \approx 4 \text{ cm}$

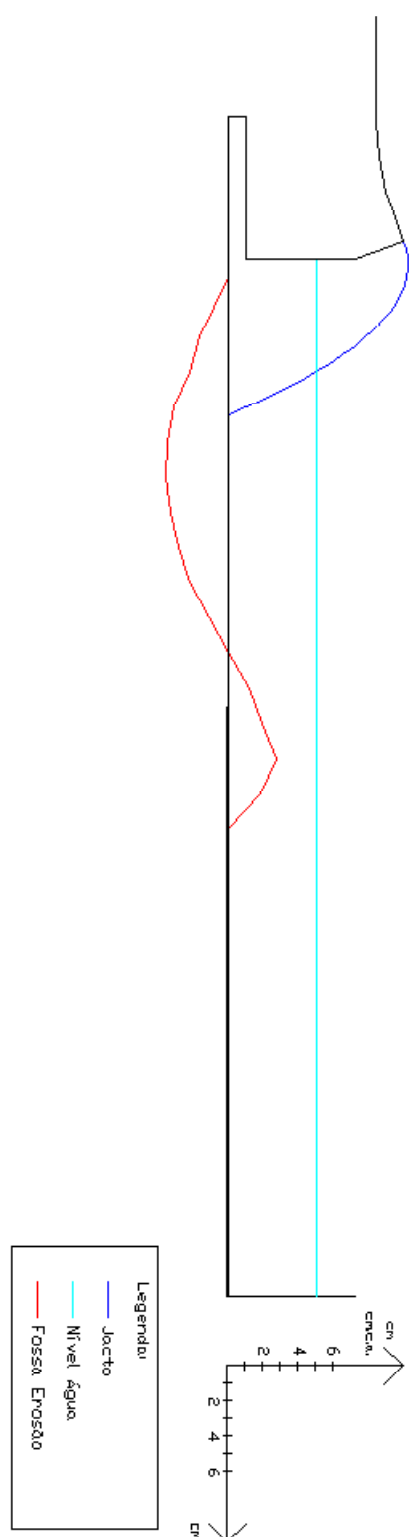


Figura VI.5. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,51$ l/s e $h \approx 5$ cm

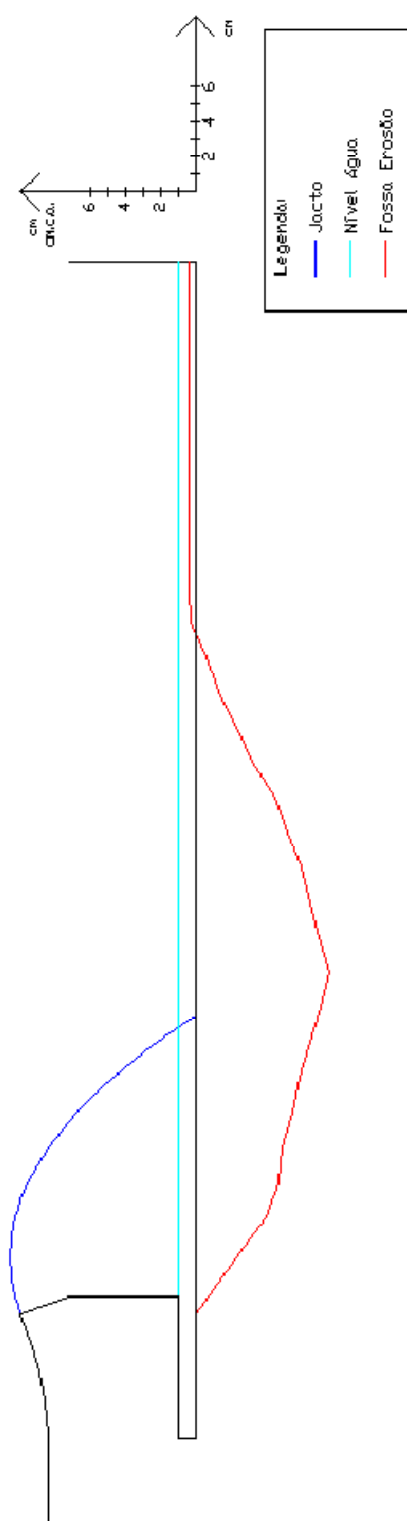


Figura VI.6. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 1$ cm

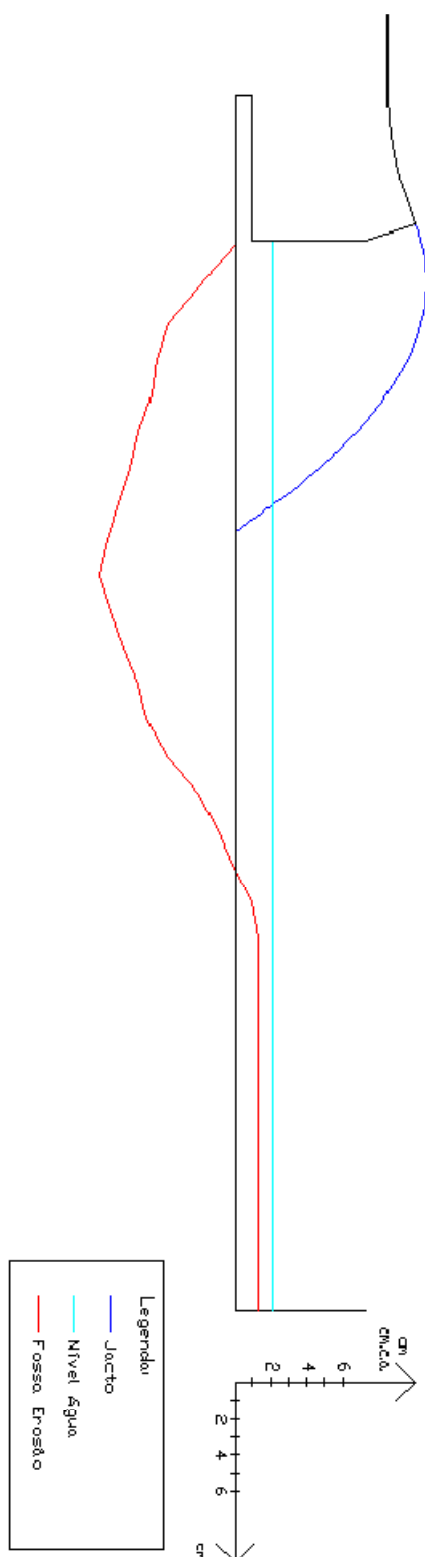


Figura VI.7. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 2$ cm



Figura VI.8. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 3$ cm



Figura VI.9. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 4$ cm



Figura VI.10. - Esquema da fossa de erosão verificada para $Q=0,85$ l/s e $h \approx 5$ cm

Quadro VI.1. - Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,51$ l/s e $h \approx 1$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	9,30	2,30
f2	5,50	10,90	3,90
f3	7,50	11,30	4,30
f4	9,50	11,60	4,60
f5	11,50	12,00	5,00
f6	13,50	12,30	5,30
f7	15,50	12,00	5,00
f8	17,50	11,20	4,20
f9	19,50	10,50	3,50
f10	21,50	9,30	2,30
f11	23,50	8,70	1,70
f12	25,50	7,90	0,90
f13	27,50	7,20	0,20
f14	29,50	6,60	-0,40
f15	31,50	6,50	-0,50
f16	33,50	6,40	-0,60
f17	35,50	6,30	-0,70
f18	37,50	6,30	-0,70
f19	39,50	6,30	-0,70
f20	41,50	6,30	-0,70
f21	43,50	6,30	-0,70
f22	45,50	6,30	-0,70
f23	47,50	6,30	-0,70
f24	49,50	6,30	-0,70
f25	51,50	7,00	0,00

Quadro VI.2.- Levantamento do perfil de erosão para $Q= 0,51$ l/s e $h \approx 2$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	8,90	1,90
f2	5,50	9,80	2,80
f3	7,50	10,80	3,80
f4	9,50	11,10	4,10
f5	11,50	11,30	4,30
f6	13,50	11,90	4,90
f7	15,50	11,30	4,30
f8	17,50	10,20	3,20
f9	19,50	9,20	2,20
f10	21,50	7,70	0,70
f11	23,50	6,90	-0,10
f12	25,50	6,30	-0,70
f13	27,50	5,90	-1,10
f14	29,50	5,60	-1,40
f15	31,50	5,50	-1,50
f16	33,50	5,50	-1,50
f17	35,50	5,50	-1,50
f18	37,50	6,00	-1,00
f19	39,50	7,00	0,00

Quadro VI.3.- Levantamento do perfil de erosão para $Q= 0,51$ l/s e $h \approx 3$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	8,42	1,42
f2	5,50	9,65	2,65
f3	7,50	10,40	3,40
f4	9,50	10,72	3,72
f5	11,50	11,20	4,20
f6	13,50	11,45	4,45
f7	15,50	10,80	3,80
f8	17,50	10,00	3,00
f9	19,50	9,20	2,20
f10	21,50	8,10	1,10
f11	23,50	7,00	0,00
f12	25,50	5,90	-1,10
f13	27,50	5,20	-1,80
f14	29,50	4,56	-2,44
f15	31,50	5,28	-1,72
f16	33,50	7,00	0,00

Quadro VI.4.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,51$ l/s e $h \approx 4$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	8,10	1,10
f2	5,50	9,00	2,00
f3	7,50	10,30	3,30
f4	9,50	10,60	3,60
f5	11,50	11,05	4,05
f6	13,50	11,10	4,10
f7	15,50	11,00	4,00
f8	17,50	10,30	3,30
f9	19,50	9,60	2,60
f10	21,50	8,50	1,50
f11	23,50	7,30	0,30
f12	25,50	6,30	-0,70
f13	27,50	5,40	-1,60
f14	29,50	4,40	-2,60
f15	31,50	4,80	-2,20
f16	33,50	7,00	0,00

Quadro VI.5.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,51$ l/s e $h \approx 5$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	7,70	0,70
f2	5,50	8,81	1,81
f3	7,50	9,46	2,46
f4	9,50	10,12	3,12
f5	11,50	10,46	3,46
f6	13,50	10,57	3,57
f7	15,50	10,26	3,26
f8	17,50	9,88	2,88
f9	19,50	9,16	2,16
f10	21,50	8,12	1,12
f11	23,50	7,02	0,02
f12	25,50	5,77	-1,23
f13	27,50	5,05	-1,95
f14	29,50	4,26	-2,74
f15	31,50	5,15	-1,85
f16	33,50	7,00	0,00

Quadro VI.6.- Levantamento do perfil de erosão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 1$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	4,74	9,68	2,68
f2	9,71	12,60	5,60
f3	13,56	13,21	6,21
f4	16,56	13,70	6,70
f5	19,96	13,80	6,80
f6	21,56	13,09	6,09
f7	24,56	11,48	4,48
f8	26,86	9,59	2,59
f9	30,36	8,63	1,63
f10	33,26	7,59	0,59
f11	44,96	6,74	-0,26
f12	57,46	7,00	0,00

Quadro VI.7.- Levantamento do perfil de erosão para $Q=0,71$ l/s e $h \approx 2$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	5,04	9,14	2,14
f2	9,71	11,80	4,80
f3	13,56	12,60	5,60
f4	16,56	12,90	5,90
f5	18,66	13,20	6,20
f6	23,66	11,43	4,43
f7	26,86	9,40	2,40
f8	29,66	7,80	0,80
f9	32,86	6,72	-0,28
f10	38,46	5,70	-1,30
f11	53,06	5,60	-1,40
f12	55,46	7,00	0,00

Quadro VI.8.- Levantamento do perfil de erosão para $Q= 0,71$ l/s e $h \approx 3$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	6,04	9,23	2,23
f2	9,71	10,48	3,48
f3	13,56	12,10	5,10
f4	16,96	12,31	5,31
f5	20,56	12,85	5,85
f6	23,96	11,85	4,85
f7	26,41	10,31	3,31
f8	30,26	8,60	1,60
f9	33,06	7,00	0,00
f10	37,96	5,20	-1,80
f11	48,72	4,65	-2,35
f12	50,66	7,00	0,00

Quadro VI.9.- Levantamento do perfil de erosão para $Q= 0,71$ l/s e $h \approx 4$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	6,94	7,67	0,67
f2	9,71	9,49	2,49
f3	13,56	11,63	4,63
f4	16,21	12,03	5,03
f5	19,06	12,50	5,50
f6	21,56	12,19	5,19
f7	24,41	11,38	4,38
f8	28,96	9,60	2,60
f9	32,76	7,81	0,81
f10	37,26	5,79	-1,21
f11	47,32	4,21	-2,79
f12	49,36	7,00	0,00

Quadro VI.10.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,71$ l/s e $h \approx 5$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	6,84	8,27	1,27
f2	9,71	9,22	2,22
f3	13,56	10,87	3,87
f4	17,06	11,40	4,40
f5	19,96	12,10	5,10
f6	21,96	11,89	4,89
f7	25,71	11,38	4,38
f8	30,31	9,13	2,13
f9	33,56	8,14	1,14
f10	38,71	5,47	-1,53
f11	44,96	3,90	-3,10
f12	49,26	7,00	0,00

Quadro VI.11. - Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,85$ l/s e $h \approx 1$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	9,60	2,60
f2	5,50	11,10	4,10
f3	7,50	11,80	4,80
f4	9,50	12,00	5,00
f5	11,50	12,60	5,60
f6	13,50	13,00	6,00
f7	15,50	13,60	6,60
f8	17,50	14,20	7,20
f9	19,50	14,70	7,70
f10	21,50	14,10	7,10
f11	23,50	13,60	6,60
f12	25,50	13,10	6,10
f13	27,50	12,30	5,30
f14	29,50	11,60	4,60
f15	31,50	10,30	3,30
f16	33,50	9,40	2,40
f17	35,50	8,30	1,30
f18	37,50	7,70	0,70
f19	39,50	6,70	-0,30
f20	41,50	6,60	-0,40
f21	43,50	6,60	-0,40
f22	45,50	6,60	-0,40
f23	47,50	6,60	-0,40
f24	49,50	6,60	-0,40
f25	51,50	6,60	-0,40
f26	53,50	6,60	-0,40
f27	55,50	6,60	-0,40
f28	57,50	6,60	-0,40
f29	59,50	6,60	-0,40

Quadro VI.12.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,85 \text{ l/s}$ e $h \approx 2 \text{ cm}$

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	9,00	2,00
f2	5,50	10,70	3,70
f3	7,50	11,30	4,30
f4	9,50	11,60	4,60
f5	11,50	12,30	5,30
f6	13,50	12,80	5,80
f7	15,50	13,40	6,40
f8	17,50	14,10	7,10
f9	19,50	14,50	7,50
f10	21,50	13,90	6,90
f11	23,50	13,20	6,20
f12	25,50	12,30	5,30
f13	27,50	11,90	4,90
f14	29,50	10,70	3,70
f15	31,50	9,10	2,10
f16	33,50	8,10	1,10
f17	35,50	7,10	0,10
f18	37,50	6,00	-1,00
f19	39,50	5,70	-1,30
f20	41,50	5,70	-1,30
f21	43,50	5,70	-1,30
f22	45,50	5,70	-1,30
f23	47,50	5,70	-1,30
f24	49,50	5,70	-1,30
f25	51,50	5,70	-1,30
f26	53,50	5,70	-1,30
f27	55,50	5,70	-1,30
f28	57,50	5,70	-1,30
f29	59,50	5,70	-1,30

Quadro VI.13.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,85 \text{ l/s}$ e $h \approx 3 \text{ cm}$

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	8,20	1,20
f2	5,50	9,20	2,20
f3	7,50	10,00	3,00
f4	9,50	11,00	4,00
f5	11,50	11,60	4,60
f6	13,50	12,50	5,50
f7	15,50	13,20	6,20
f8	17,50	13,80	6,80
f9	19,50	14,30	7,30
f10	21,50	13,60	6,60
f11	23,50	12,90	5,90
f12	25,50	12,20	5,20
f13	27,50	11,60	4,60
f14	29,50	10,90	3,90
f15	31,50	10,20	3,20
f16	33,50	9,20	2,20
f17	35,50	8,20	1,20
f18	37,50	7,10	0,10
f19	39,50	6,30	-0,70
f20	41,50	5,60	-1,40
f21	43,50	5,20	-1,80
f22	45,50	4,70	-2,30
f23	47,50	4,70	-2,30
f24	49,50	4,70	-2,30
f25	51,50	4,70	-2,30
f26	53,50	4,70	-2,30
f27	55,50	4,70	-2,30
f28	57,50	4,70	-2,30
f29	59,50	4,70	-2,30

Quadro VI.14.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,85$ l/s e $h \approx 4$ cm

Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	8,00	1,00
f2	5,50	8,90	1,90
f3	7,50	9,00	2,00
f4	9,50	10,10	3,10
f5	11,50	11,10	4,10
f6	13,50	12,30	5,30
f7	15,50	12,70	5,70
f8	17,50	13,00	6,00
f9	19,50	13,90	6,90
f10	21,50	13,20	6,20
f11	23,50	12,60	5,60
f12	25,50	12,40	5,40
f13	27,50	12,10	5,10
f14	29,50	11,20	4,20
f15	31,50	10,40	3,40
f16	33,50	9,60	2,60
f17	35,50	8,90	1,90
f18	37,50	7,10	0,10
f19	39,50	5,90	-1,10
f20	41,50	5,70	-1,30
f21	43,50	5,50	-1,50
f22	45,50	4,90	-2,10
f23	47,50	4,60	-2,40
f24	49,50	4,20	-2,80
f25	51,50	4,20	-2,80
f26	53,50	4,20	-2,80
f27	55,50	4,20	-2,80
f28	57,50	5,50	-1,50
f29	59,50	7,00	0,00

Quadro VI.15.- Levantamento do perfil de erosão para $Q = 0,85 \text{ l/s}$ e $h \approx 5 \text{ cm}$

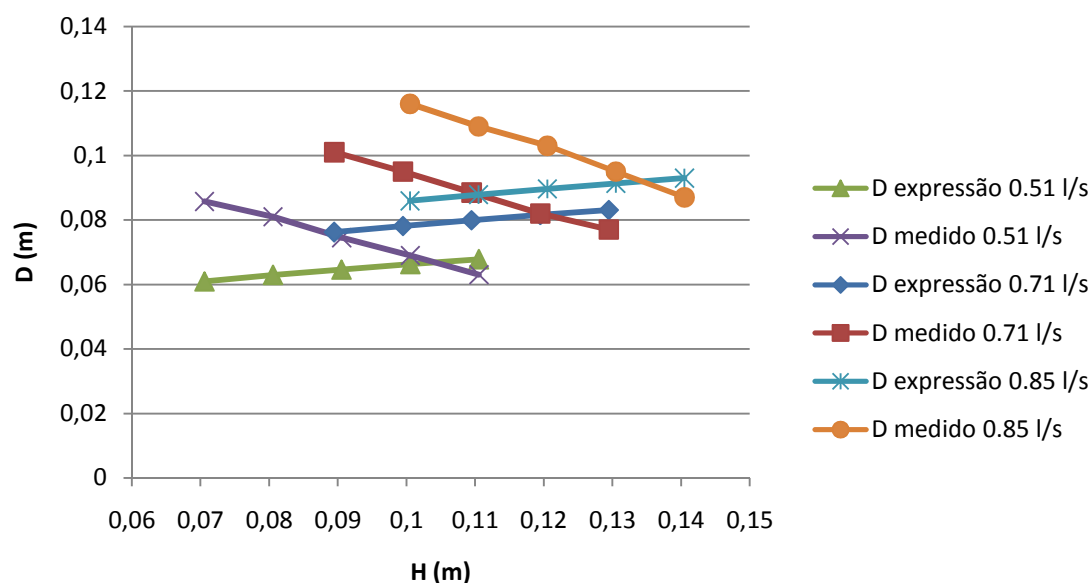
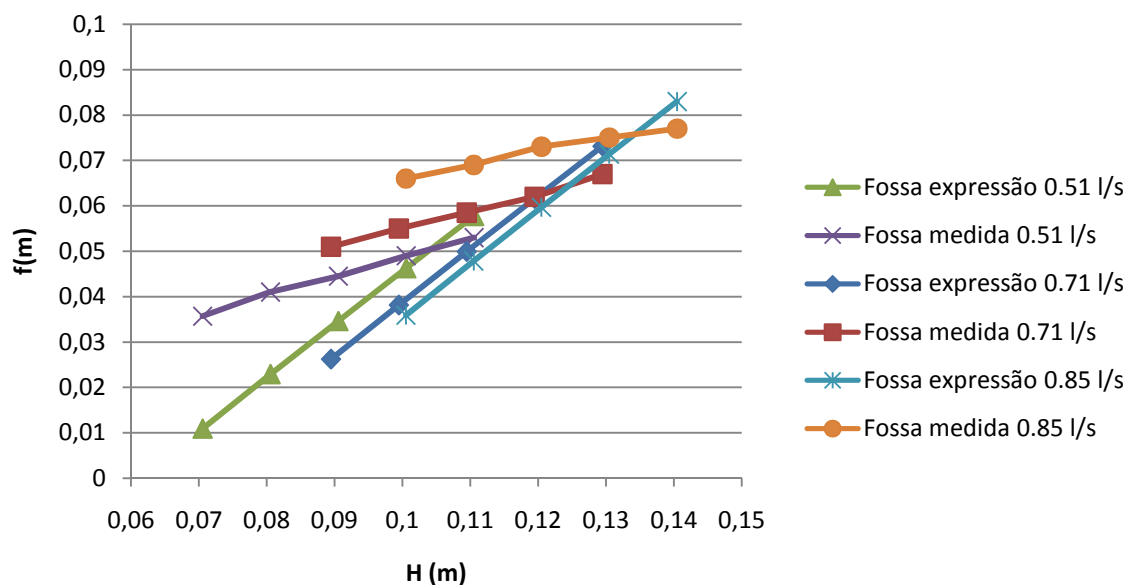
Ponto	a (cm)	F (cm)	f (cm)
f1	3,50	8,00	1,00
f2	5,50	8,30	1,30
f3	7,50	9,40	2,40
f4	9,50	10,00	3,00
f5	11,50	11,40	4,40
f6	13,50	12,20	5,20
f7	15,50	13,30	6,30
f8	17,50	13,40	6,40
f9	19,50	13,60	6,60
f10	21,50	13,50	6,50
f11	23,50	13,10	6,10
f12	25,50	12,70	5,70
f13	27,50	11,80	4,80
f14	29,50	11,00	4,00
f15	31,50	10,20	3,20
f16	33,50	9,20	2,20
f17	35,50	8,50	1,50
f18	37,50	7,80	0,80
f19	39,50	6,90	-0,10
f20	41,50	6,20	-0,80
f21	43,50	5,80	-1,20
f22	45,50	5,10	-1,90
f23	47,50	4,60	-2,40
f24	49,50	4,50	-2,50
f25	51,50	4,40	-2,60
f26	53,50	4,30	-2,70
f27	55,50	5,30	-1,70
f28	57,50	6,50	-0,50
f29	59,50	7,00	0,00

Anexo VII

CÁLCULO TEÓRICO DAS PROFUNDIDADES MÁXIMAS DAS FOSSAS DE EROSÃO

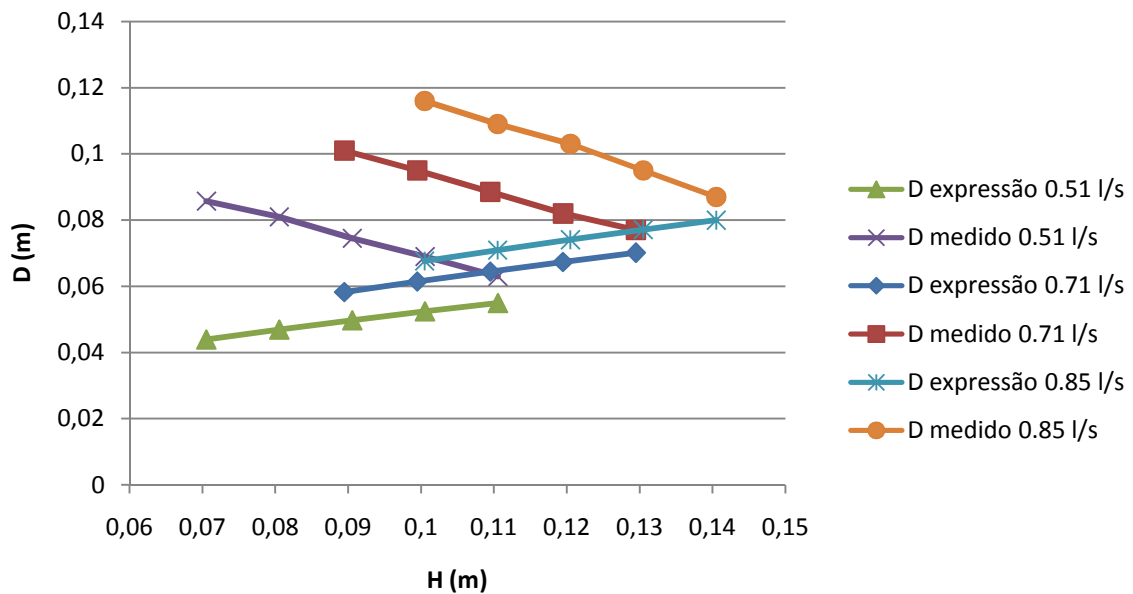
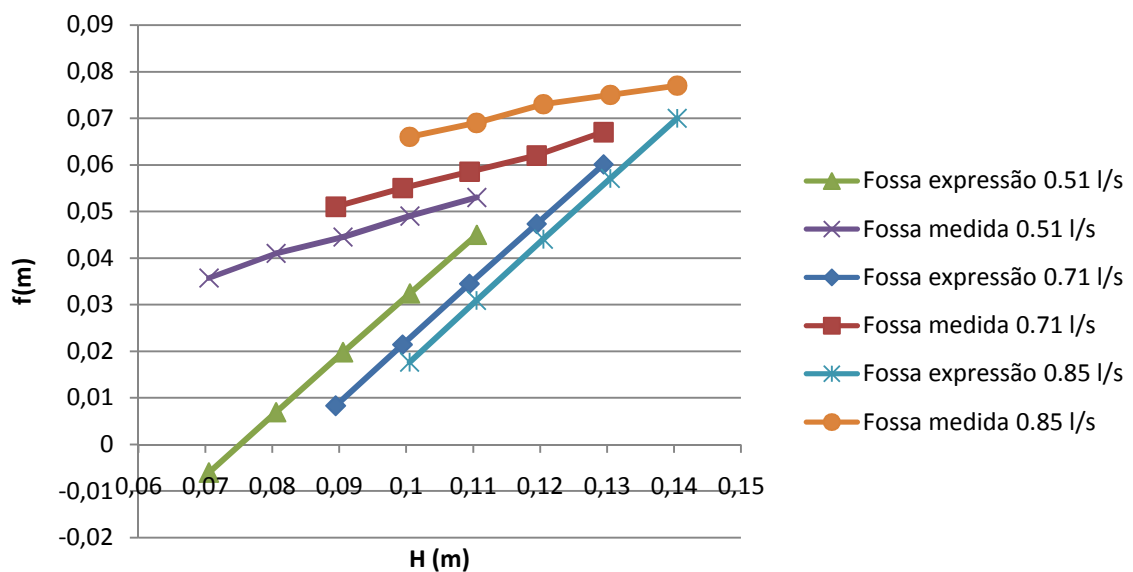
Quadro VII.1. - Valores D e f para a expressão de Chian Min Wu

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0677	0,0577	0,0831	0,0731	0,0929	0,0829
0,02	0,0662	0,0462	0,0815	0,0615	0,0913	0,0713
0,03	0,0646	0,0346	0,0799	0,0499	0,0896	0,0596
0,04	0,0629	0,0229	0,0781	0,0381	0,0878	0,0478
0,05	0,0610	0,0110	0,0762	0,0262	0,0859	0,0359

Figura VII.1. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Chian Min WuFigura VII.2. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Chian Min Wu

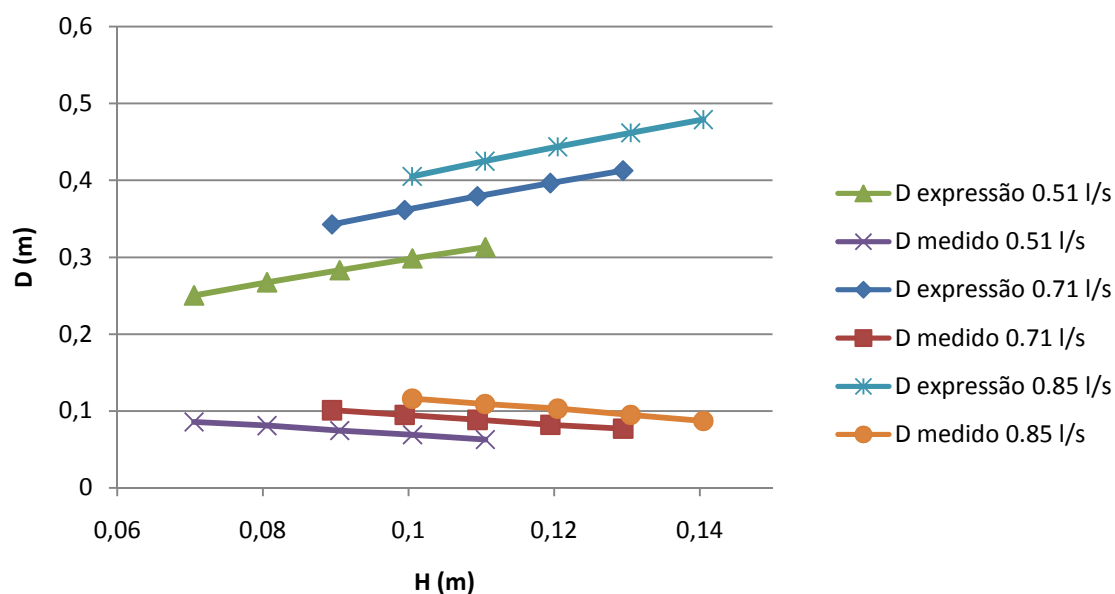
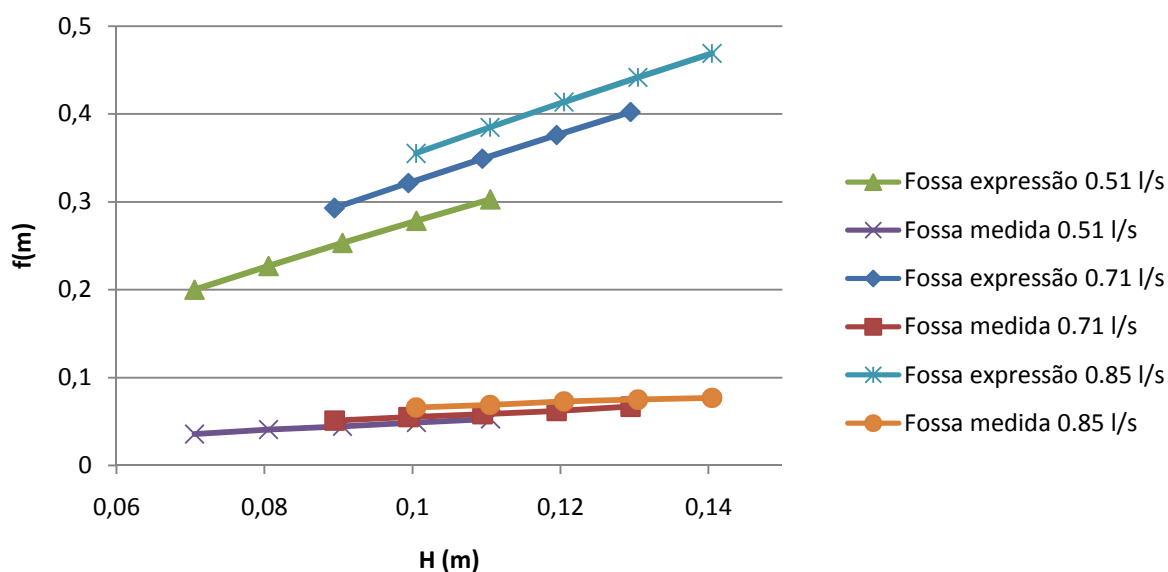
Quadro VII.2. - Valores D e f para a expressão de Damle (A)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0550	0,0450	0,0701	0,0601	0,0800	0,0700
0,02	0,0524	0,0324	0,0673	0,0473	0,0771	0,0571
0,03	0,0498	0,0198	0,0645	0,0345	0,0741	0,0441
0,04	0,0469	0,0069	0,0614	0,0214	0,0709	0,0309
0,05	0,0439	-0,0061	0,0583	0,0083	0,0676	0,0176

Figura VII.3. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Damle (A)Figura VII.4. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Damle (A)

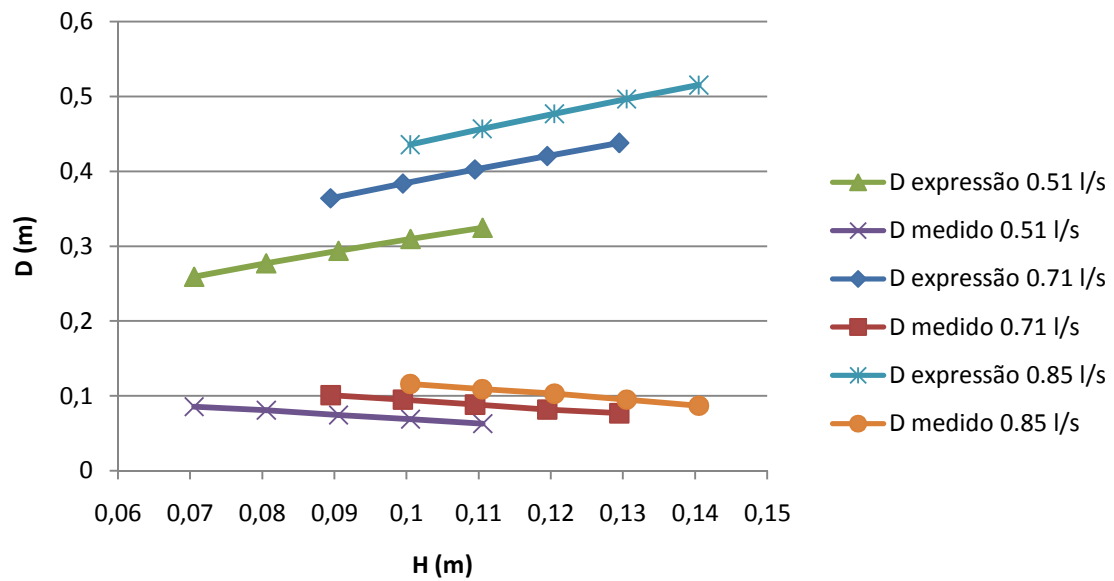
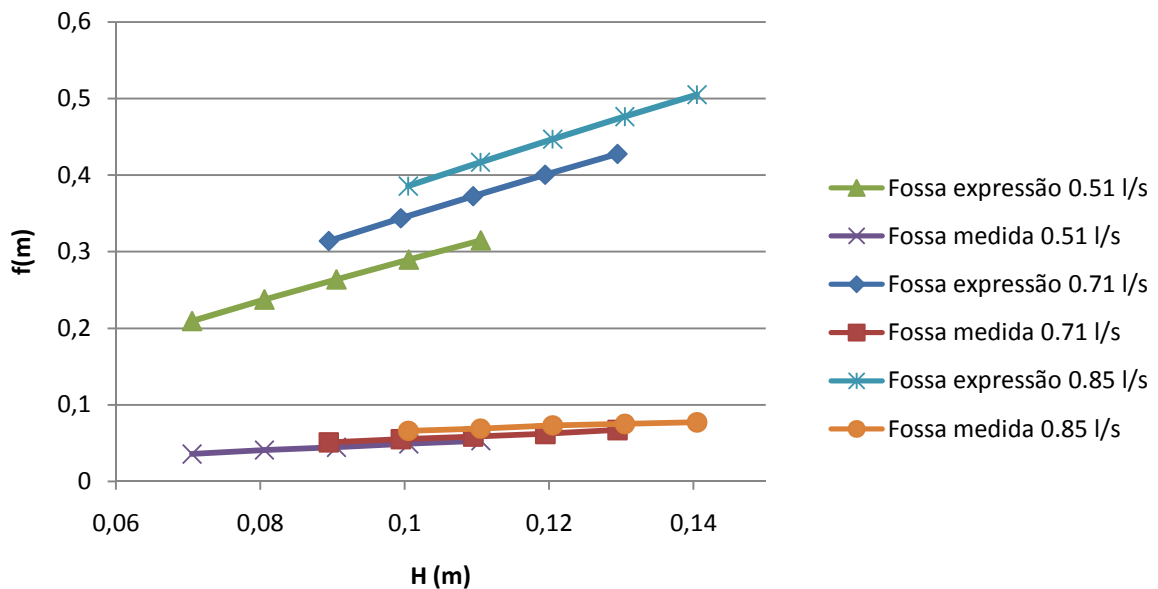
Quadro VII.3. - Valores D e f para a expressão de Eggenberger

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,3129	0,3029	0,4123	0,4023	0,4790	0,4690
0,02	0,2984	0,2784	0,3961	0,3761	0,4616	0,4416
0,03	0,2832	0,2532	0,3791	0,3491	0,4436	0,4136
0,04	0,2671	0,2271	0,3614	0,3214	0,4248	0,3848
0,05	0,2500	0,2000	0,3427	0,2927	0,4051	0,3551

Figura VII.5. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de EggenbergerFigura VII.6. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Eggenberger

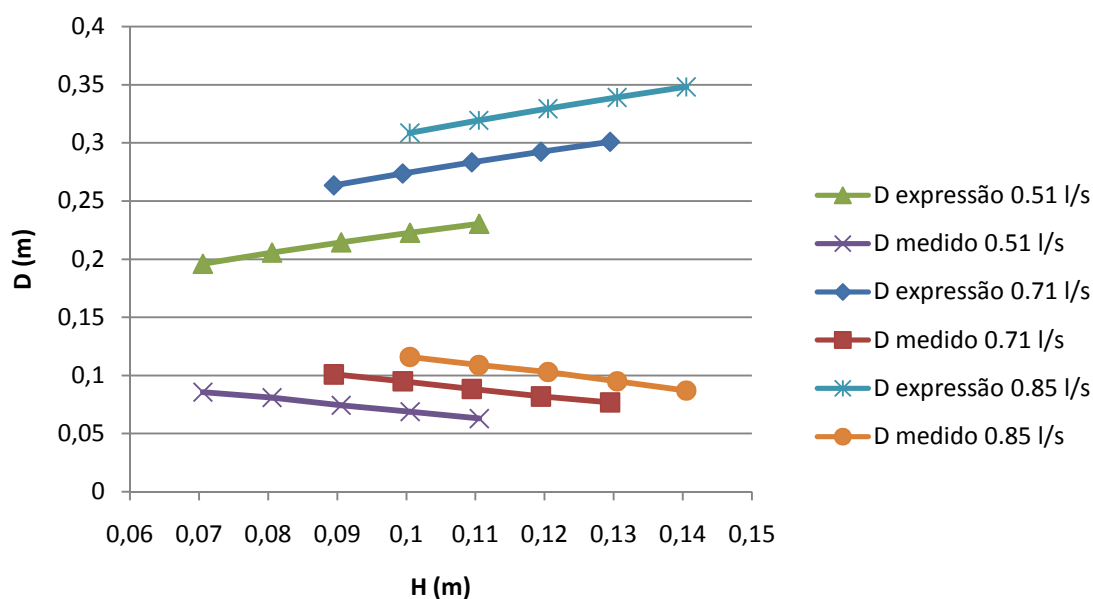
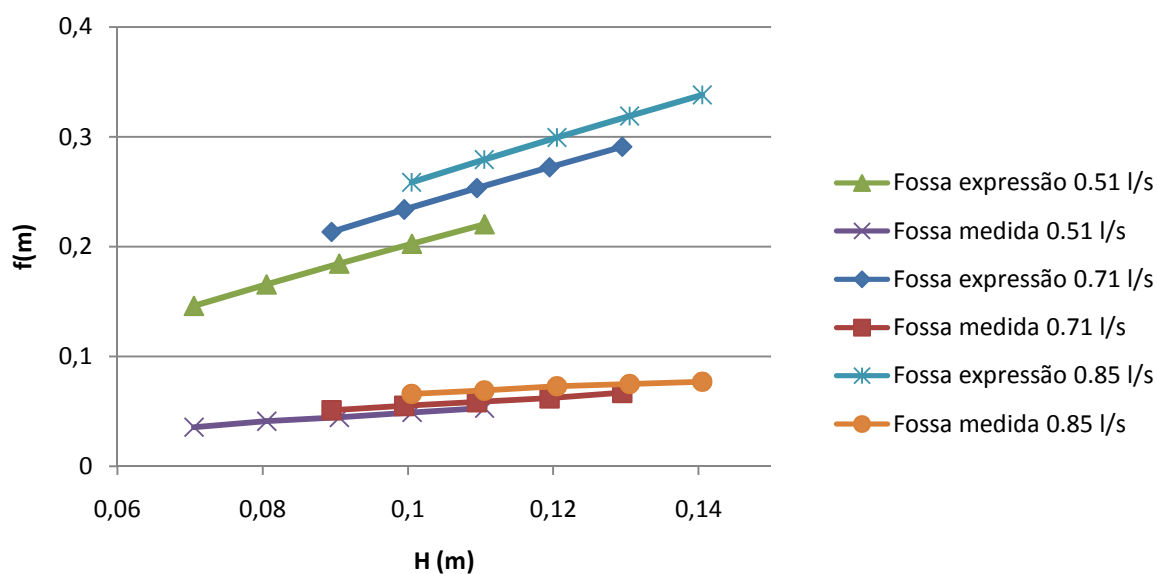
Quadro VII.4. - Valores D e f para a expressão de Franke

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,3246	0,3146	0,4377	0,4277	0,5150	0,5050
0,02	0,3096	0,2896	0,4204	0,4004	0,4963	0,4763
0,03	0,2938	0,2638	0,4024	0,3724	0,4769	0,4469
0,04	0,2771	0,2371	0,3836	0,3436	0,4567	0,4167
0,05	0,2594	0,2094	0,3638	0,3138	0,4355	0,3855

Figura VII.7. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de FrankeFigura VII.8. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Franke

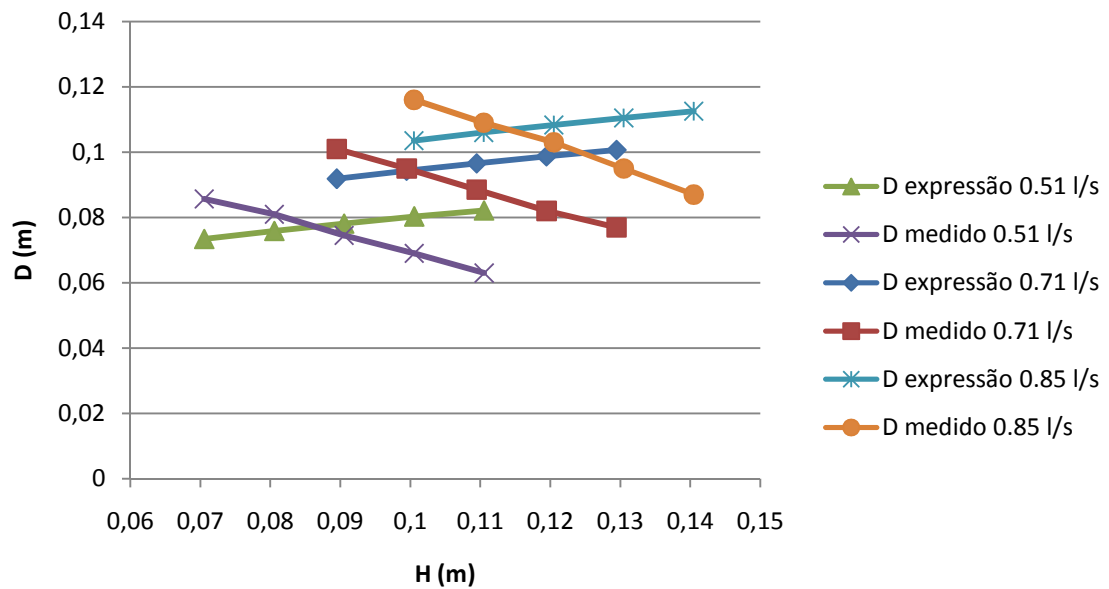
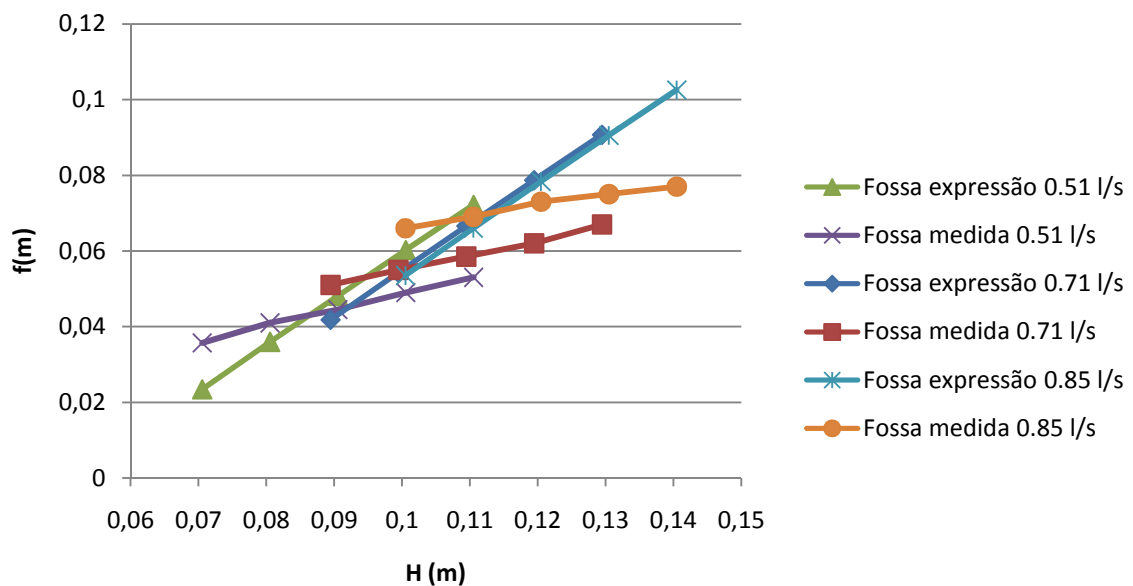
Quadro VII.5. - Valores D e f para a expressão de Hartung

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,2304	0,2204	0,3009	0,2909	0,3481	0,3381
0,02	0,2227	0,2027	0,2923	0,2723	0,3390	0,3190
0,03	0,2145	0,1845	0,2832	0,2532	0,3294	0,2994
0,04	0,2056	0,1656	0,2736	0,2336	0,3193	0,2793
0,05	0,1960	0,1460	0,2634	0,2134	0,3085	0,2585

Figura VII.9. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de HartungFigura VII.10. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Hartung

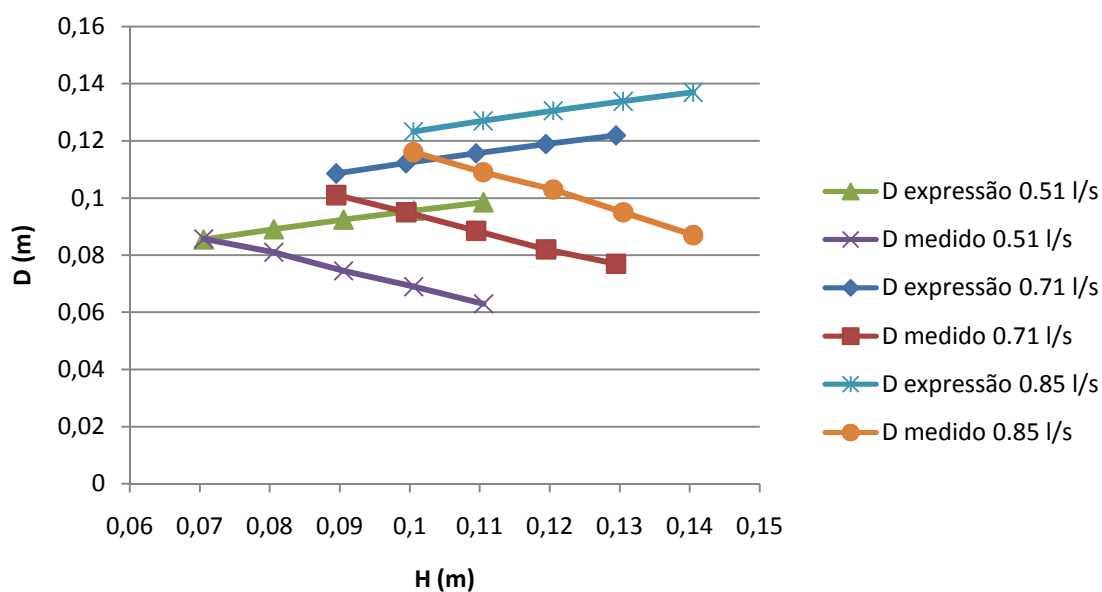
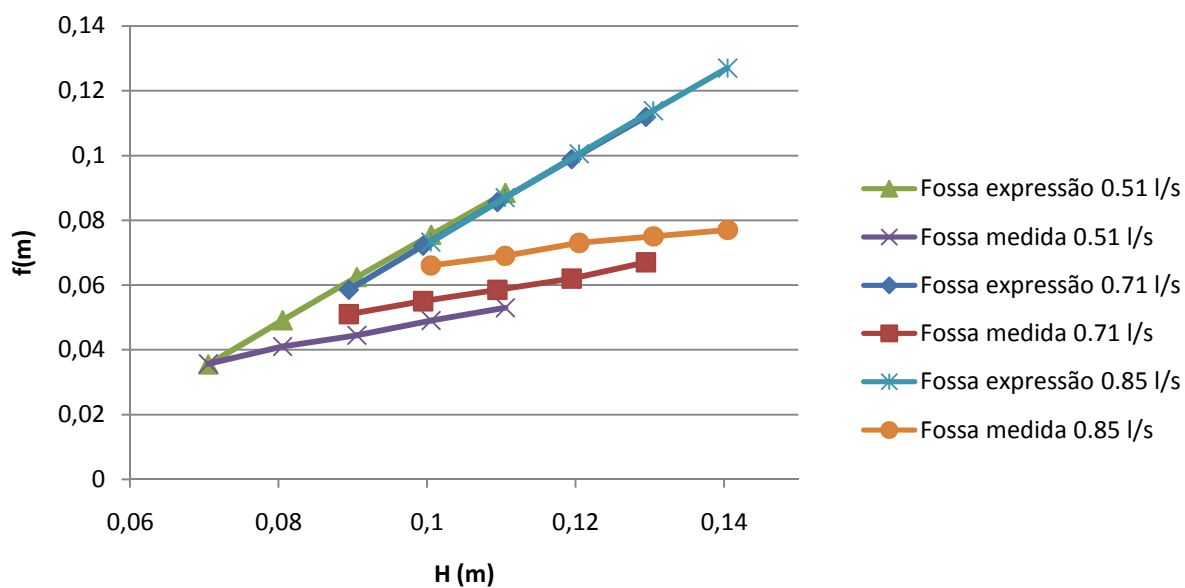
Quadro VII.6. - Valores D e f para a expressão de INCYTH

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0822	0,0722	0,1007	0,0907	0,1126	0,1026
0,02	0,0802	0,0602	0,0987	0,0787	0,1105	0,0905
0,03	0,0782	0,0482	0,0966	0,0666	0,1083	0,0783
0,04	0,0759	0,0359	0,0943	0,0543	0,1060	0,0660
0,05	0,0734	0,0234	0,0918	0,0418	0,1035	0,0535

Figura VII.11. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de INCYTHFigura VII.12. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de INCYTH

Quadro VII.7. - Valores D e f para a expressão de Machado (A)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0984	0,0884	0,1219	0,1119	0,1370	0,1270
0,02	0,0955	0,0755	0,1188	0,0988	0,1338	0,1138
0,03	0,0925	0,0625	0,1156	0,0856	0,1305	0,1005
0,04	0,0891	0,0491	0,1122	0,0722	0,1270	0,0870
0,05	0,0855	0,0355	0,1085	0,0585	0,1233	0,0733

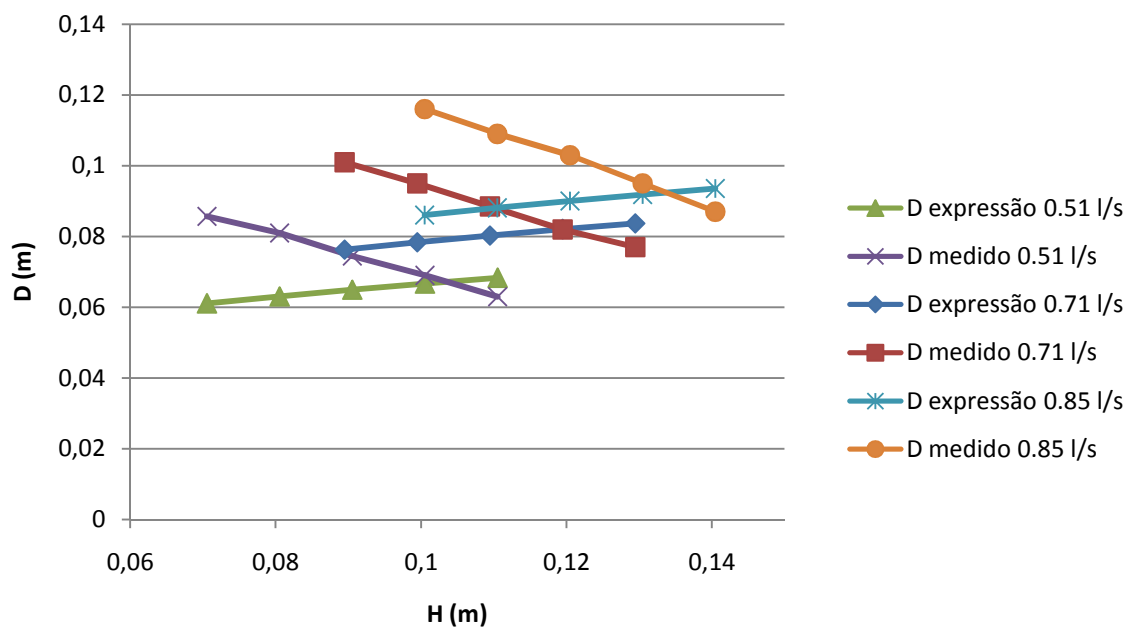
Figura VII.13. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Machado (A)Figura VII.14. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Machado (A)

Quadro VII.8. - Valores D e f para a expressão de Martins (B)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0767	0,0667	0,0949	0,0849	0,1067	0,0967
0,02	0,0760	0,0560	0,0941	0,0741	0,1059	0,0859
0,03	0,0752	0,0452	0,0933	0,0633	0,1051	0,0751
0,04	0,0743	0,0343	0,0924	0,0524	0,1041	0,0641
0,05	0,0733	0,0233	0,0914	0,0414	0,1032	0,0532

Quadro VII.9. - Valores D e f para a expressão de Patrashev

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0683	0,0583	0,0837	0,0737	0,0936	0,0836
0,02	0,0667	0,0467	0,0820	0,0620	0,0918	0,0718
0,03	0,0650	0,0350	0,0803	0,0503	0,0900	0,0600
0,04	0,0631	0,0231	0,0784	0,0384	0,0881	0,0481
0,05	0,0610	0,0110	0,0763	0,0263	0,0860	0,0360

Figura VII.15. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Patrashev

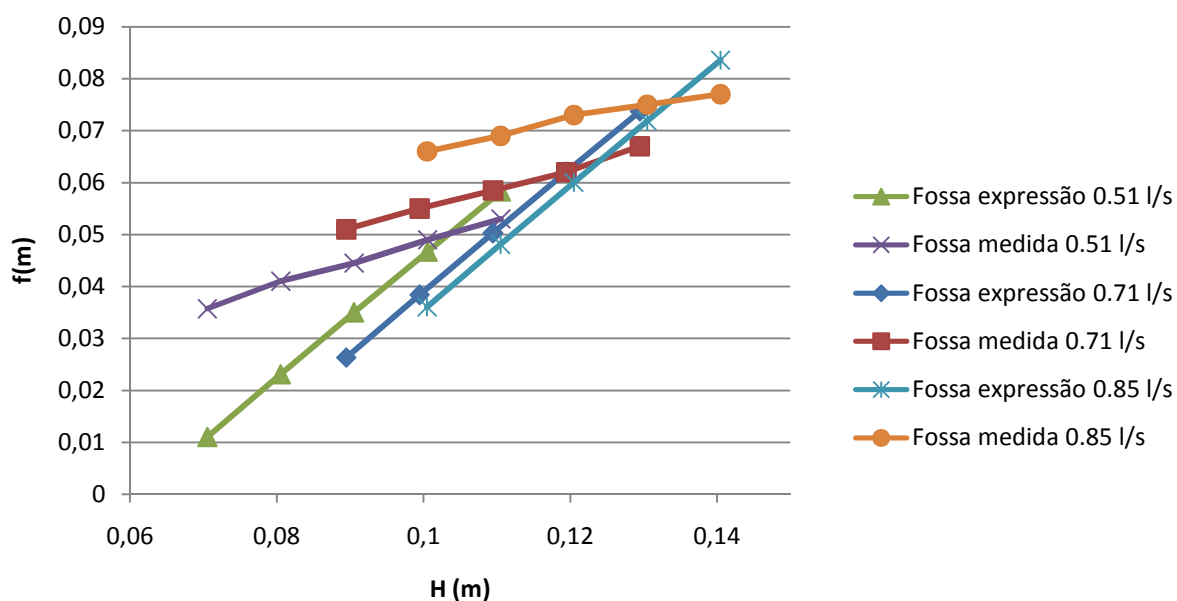


Figura VII.16. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Patrashev

Quadro VII.10. - Valores D e f para a expressão de Schoktisch

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)
0,01	0,0594	0,0494	0,0739	0,0639	0,0833	0,0733
0,02	0,0583	0,0383	0,0727	0,0527	0,0821	0,0621
0,03	0,0571	0,0271	0,0715	0,0415	0,0808	0,0508
0,04	0,0558	0,0158	0,0701	0,0301	0,0794	0,0394
0,05	0,0543	0,0043	0,0687	0,0187	0,0779	0,0279

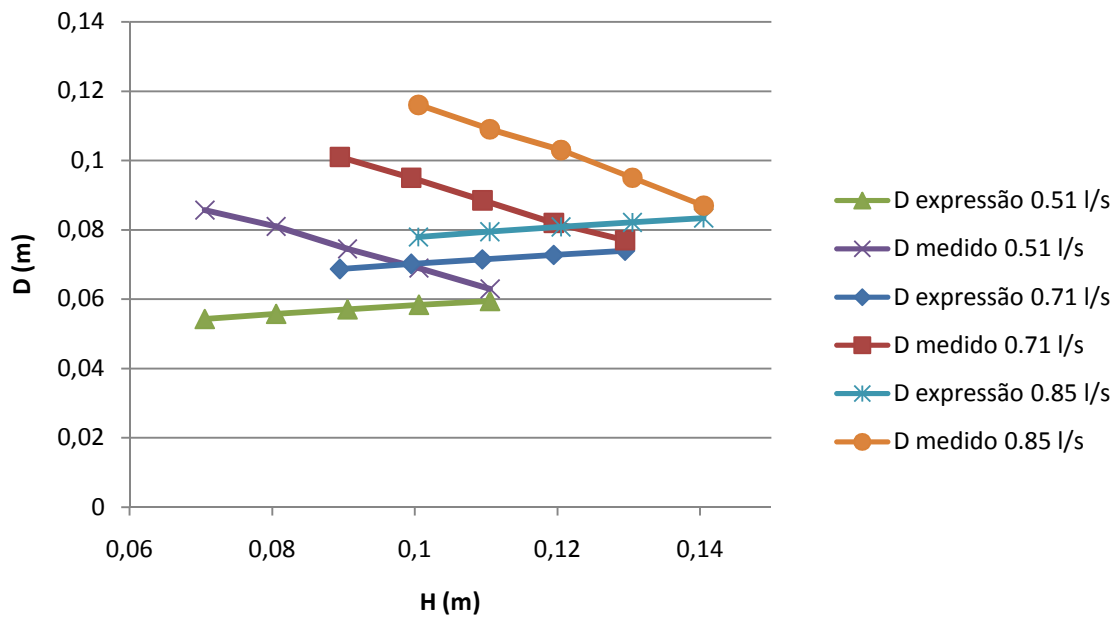


Figura VII.17. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Schoktlich

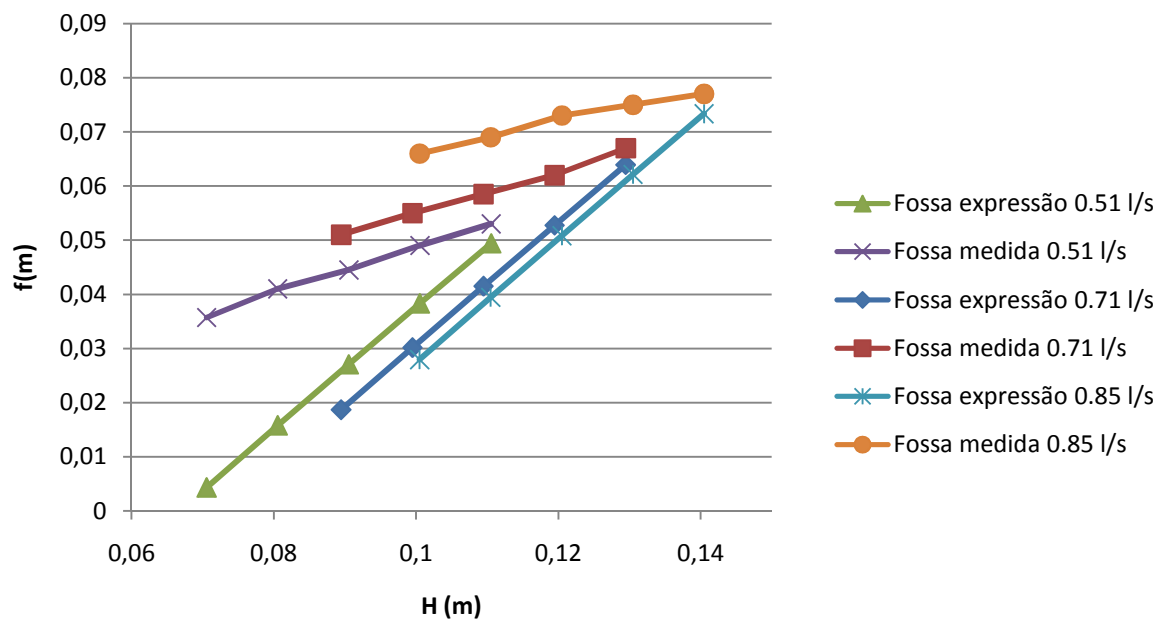
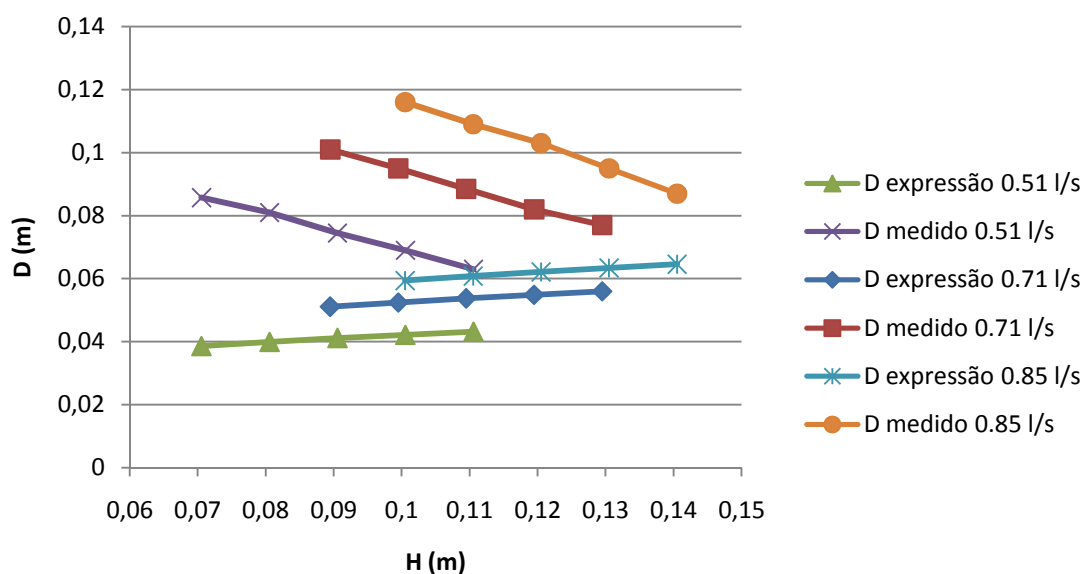
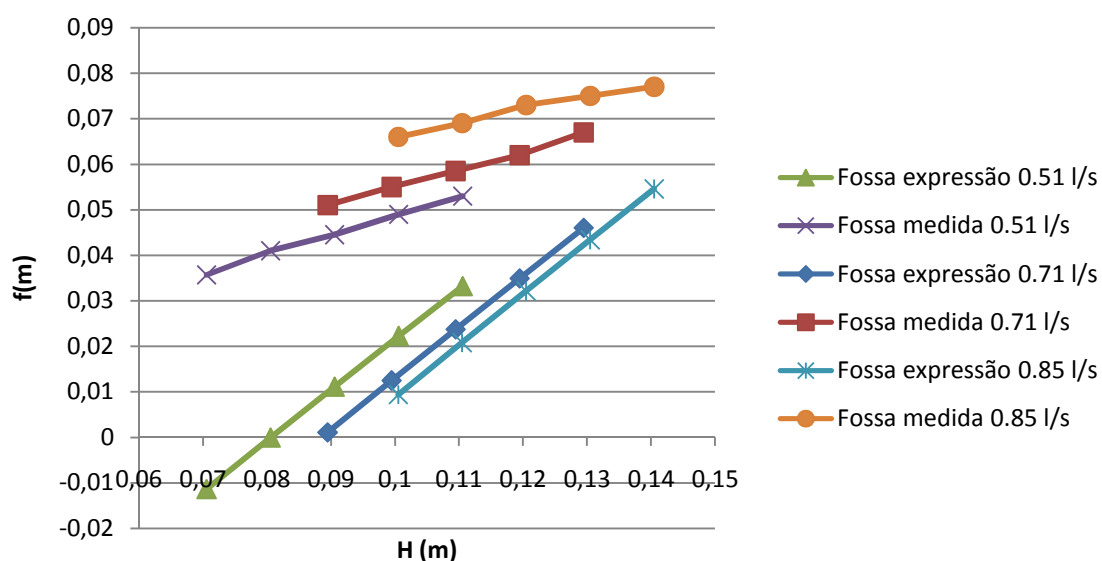


Figura VII.18. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Schoktlich

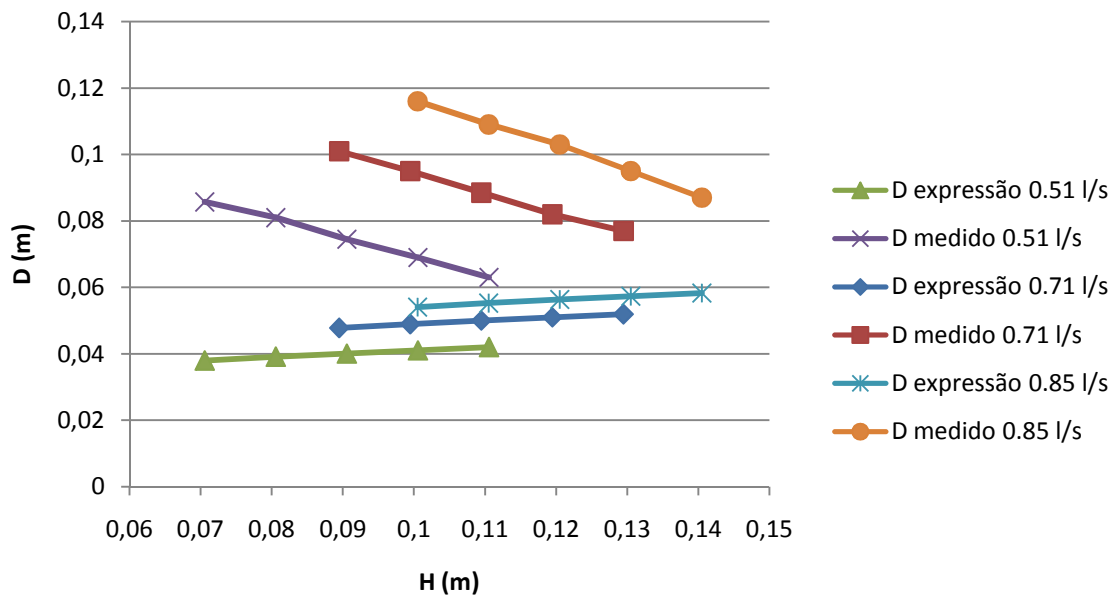
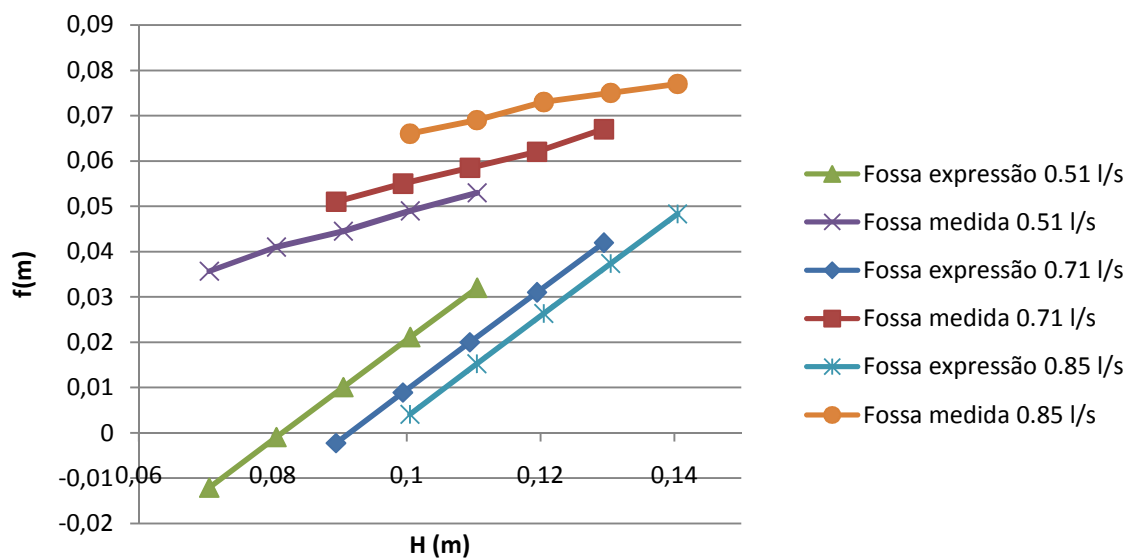
Quadro VII.11. - Valores D e f para a expressão de Taraimovich

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0432	0,0332	0,0560	0,0460	0,0646	0,0546
0,02	0,0422	0,0222	0,0549	0,0349	0,0634	0,0434
0,03	0,0411	0,0111	0,0537	0,0237	0,0621	0,0321
0,04	0,0399	-0,0001	0,0524	0,0124	0,0608	0,0208
0,05	0,0386	-0,0114	0,0511	0,0011	0,0594	0,0094

Figura VII.19. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de TaraimovichFigura VII.20. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Taraimovich

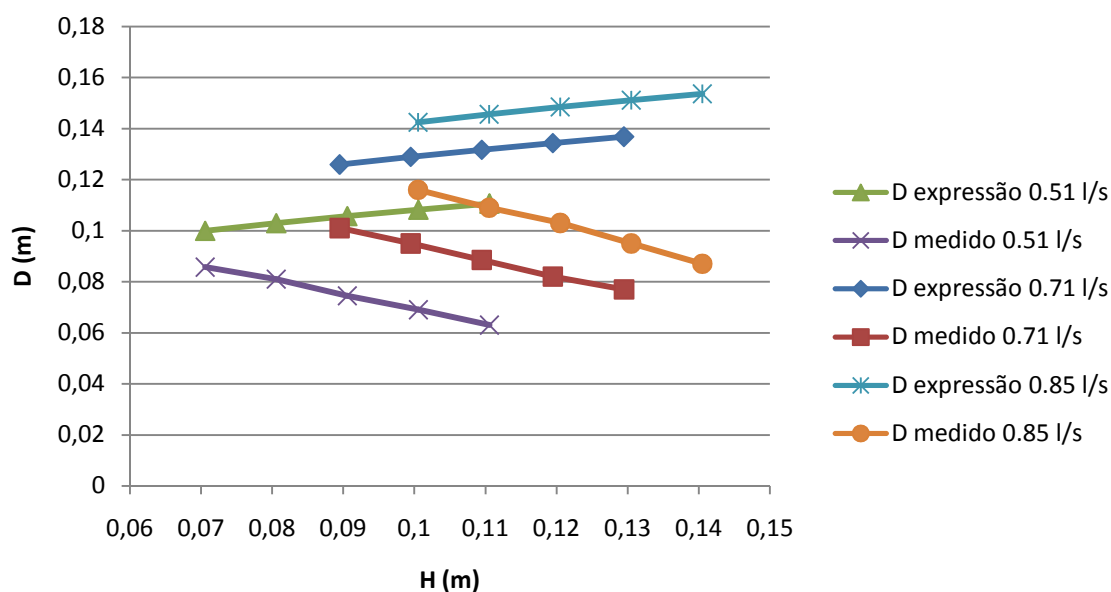
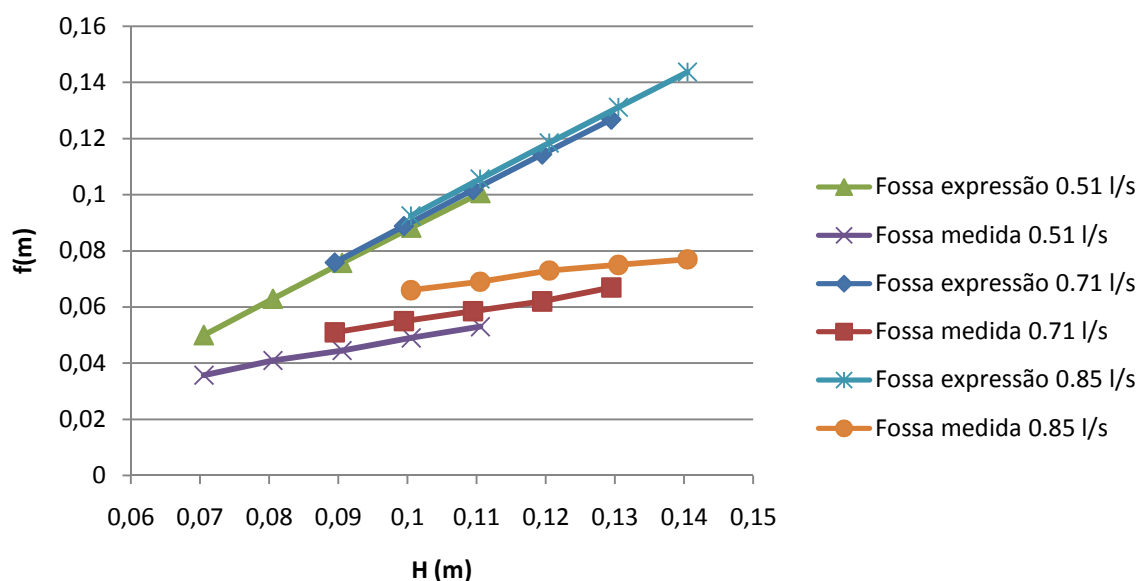
Quadro VII.12. - Valores D e f para a expressão de Veronese (A)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0420	0,0320	0,0519	0,0419	0,0583	0,0483
0,02	0,0411	0,0211	0,0510	0,0310	0,0574	0,0374
0,03	0,0401	0,0101	0,0500	0,0200	0,0564	0,0264
0,04	0,0391	-0,0009	0,0489	0,0089	0,0553	0,0153
0,05	0,0379	-0,0121	0,0478	-0,0022	0,0541	0,0041

Figura VII.21. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Veronese (A)Figura VII.22. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Veronese (A)

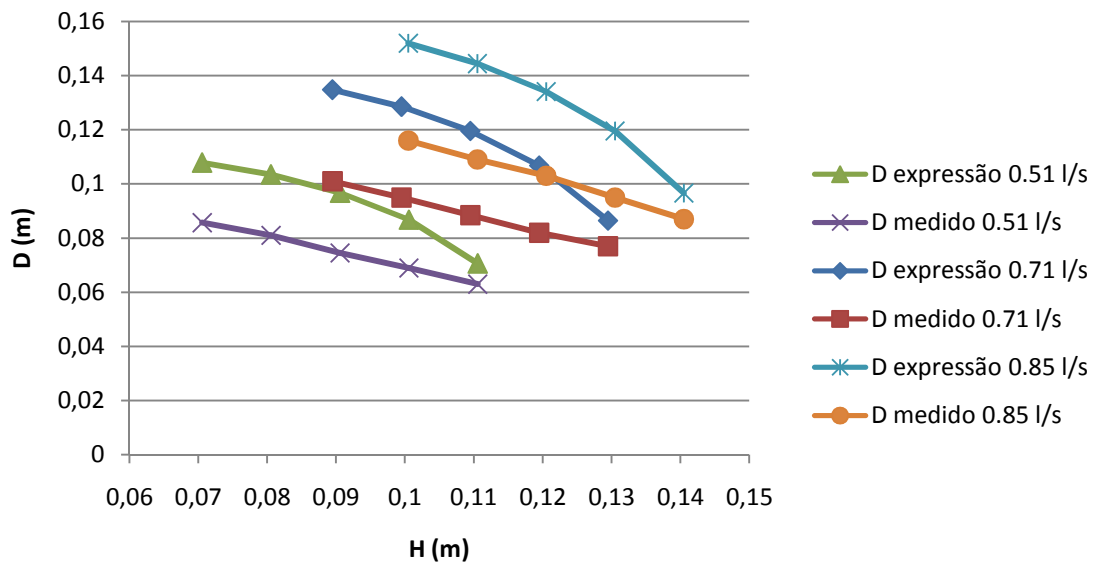
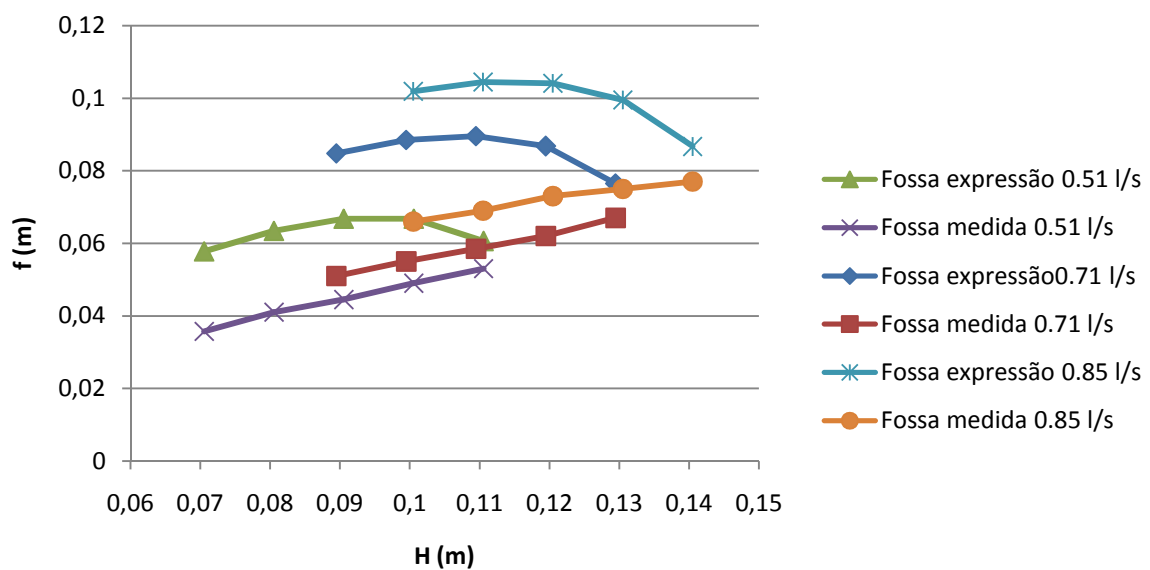
Quadro VII.13. - Valores D e f para a expressão de Veronese (B)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,1106	0,1006	0,1368	0,1268	0,1537	0,1437
0,02	0,1082	0,0882	0,1343	0,1143	0,1511	0,1311
0,03	0,1057	0,0757	0,1317	0,1017	0,1484	0,1184
0,04	0,1030	0,0630	0,1289	0,0889	0,1456	0,1056
0,05	0,0999	0,0499	0,1258	0,0758	0,1425	0,0925

Figura VII.23. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Veronese (B)Figura VII.24. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Veronese (B)

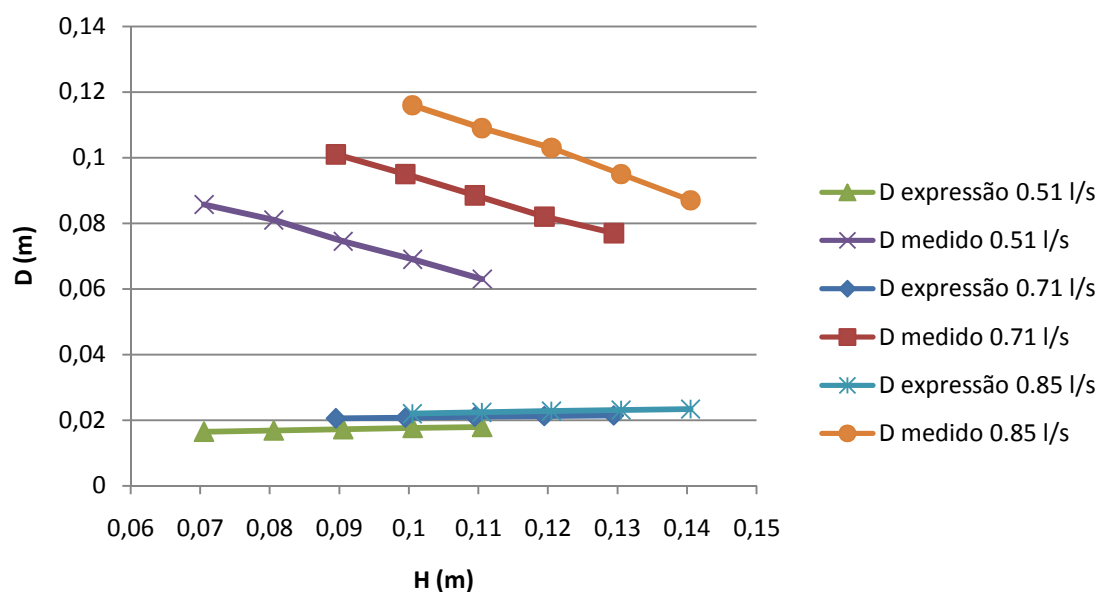
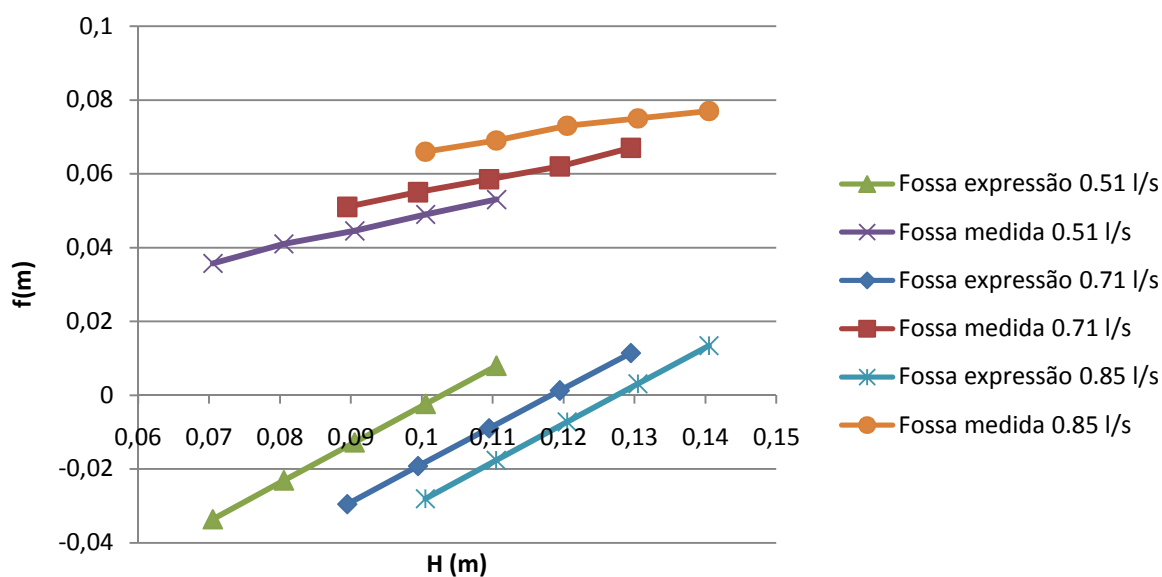
Quadro VII.14. - Valores D e f para a expressão de Jaeger

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0706	0,0606	0,0865	0,0765	0,0967	0,0867
0,02	0,0868	0,0668	0,1068	0,0868	0,1195	0,0995
0,03	0,0968	0,0668	0,1195	0,0895	0,1341	0,1041
0,04	0,1034	0,0634	0,1285	0,0885	0,1444	0,1044
0,05	0,1078	0,0578	0,1347	0,0847	0,1519	0,1019

Figura VII.25. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de JaegerFigura VII.26. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Jaeger

Quadro VII.15. - Valores D e f para a expressão de Martins (A)

h (m)	Q= 0,51 l/s			Q= 0,71 l/s			Q= 0,85 l/s		
	N	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	N	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	N	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	5,1003	0,7157	0,0179	6,0721	0,8571	0,0214	6,6800	0,9369	0,0234
0,02	4,9977	0,7030	0,0176	5,9684	0,8495	0,0212	6,5751	0,9239	0,0231
0,03	4,8868	0,6891	0,0172	5,8576	0,8410	0,0210	6,4638	0,9099	0,0227
0,04	4,7658	0,6738	0,0168	5,7386	0,8312	0,0208	6,3449	0,8949	0,0224
0,05	4,6323	0,6566	0,0164	5,6098	0,8201	0,0205	6,2172	0,8786	0,0220

Figura VII.27. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Martins (A)Figura VII.28. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Martins (A)

Quadro VII.16. - Valores D e f para a expressão de Mason & Arumugam (A)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0741	0,0641	0,0910	0,0810	0,1019	0,0919
0,02	0,0819	0,0619	0,1005	0,0805	0,1126	0,0926
0,03	0,0865	0,0565	0,1064	0,0764	0,1192	0,0892
0,04	0,0898	0,0498	0,1105	0,0705	0,1239	0,0839
0,05	0,0923	0,0423	0,1137	0,0637	0,1275	0,0775

Quadro VII.17. - Valores envolvidos na determinação de D e f pela expressão de Mason & Arumugam (B)

h (m)	Q= 0,51 l/s			Q= 0,71 l/s			Q= 0,85 l/s		
	K	x	y	K	x	y	K	x	y
0,01	2,8231	0,5853	0,1721	2,7658	0,5827	0,1759	2,7359	0,5813	0,1781
0,02	2,8571	0,5866	0,1701	2,7951	0,5841	0,1739	2,7630	0,5826	0,1761
0,03	2,8942	0,5879	0,1681	2,8266	0,5854	0,1719	2,7920	0,5839	0,1741
0,04	2,9352	0,5893	0,1661	2,8609	0,5867	0,1699	2,8233	0,5853	0,1721
0,05	2,9811	0,5906	0,1641	2,8984	0,5881	0,1679	2,8573	0,5866	0,1701

Quadro VII.18. - Valores D e f para a expressão de Mason & Arumugam (B)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0800	0,0700	0,0979	0,0879	0,1093	0,0993
0,02	0,0882	0,0682	0,1080	0,0880	0,1208	0,1008
0,03	0,0932	0,0632	0,1142	0,0842	0,1277	0,0977
0,04	0,0966	0,0566	0,1186	0,0786	0,1327	0,0927
0,05	0,0992	0,0492	0,1219	0,0719	0,1365	0,0865

Quadro VII.19. - Valores D e f para a expressão de Rubinstein

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,1697	0,1597	0,2552	0,2452	0,3207	0,3107
0,02	0,1529	0,1329	0,2226	0,2026	0,2759	0,2559
0,03	0,1521	0,1221	0,2146	0,1846	0,2624	0,2324
0,04	0,1573	0,1173	0,2156	0,1756	0,2601	0,2201
0,05	0,1660	0,1160	0,2215	0,1715	0,2638	0,2138

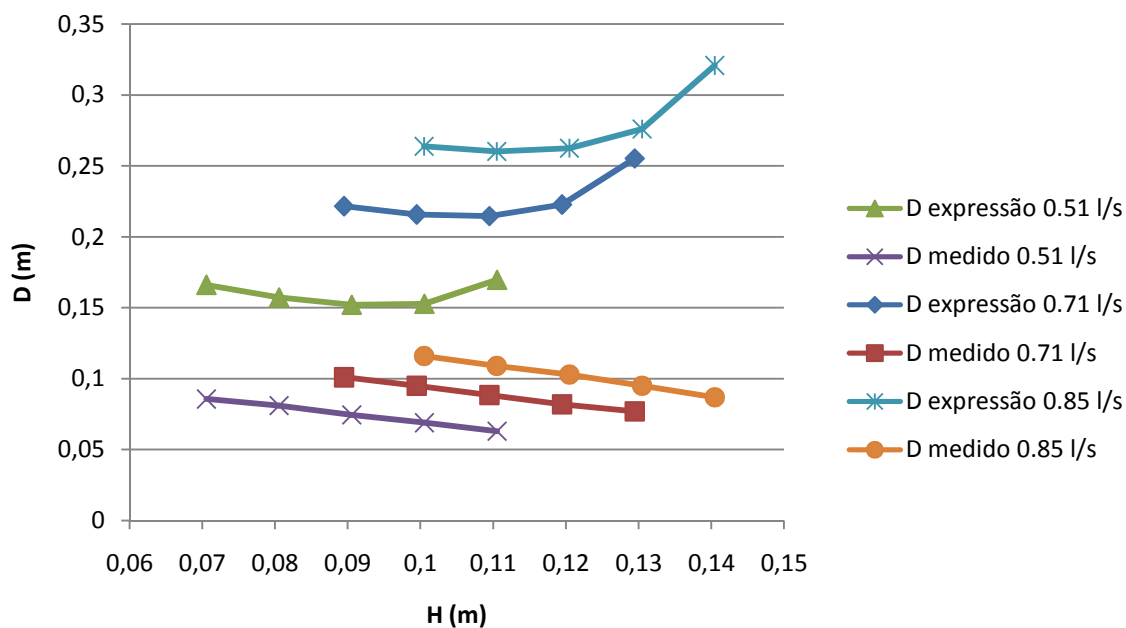


Figura VII.29. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Rubinstein

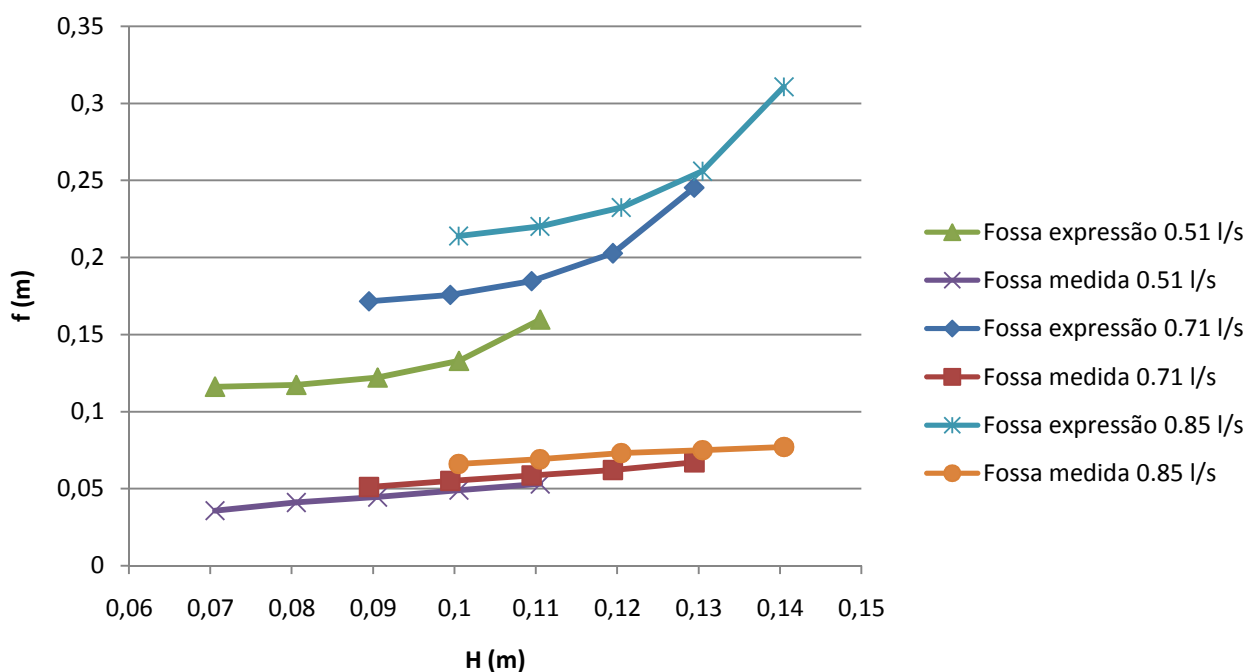
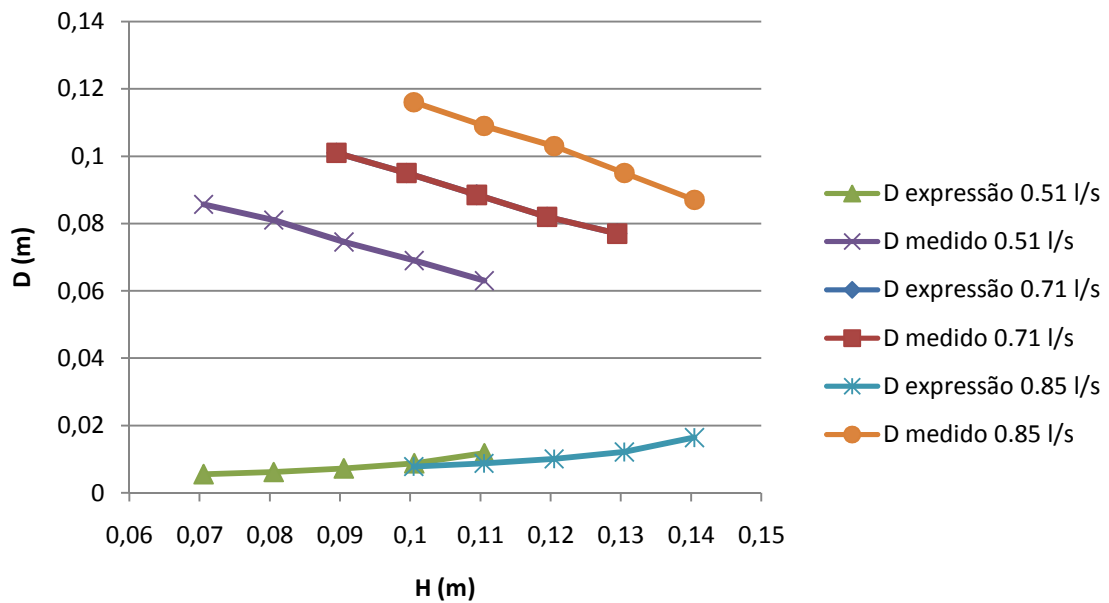
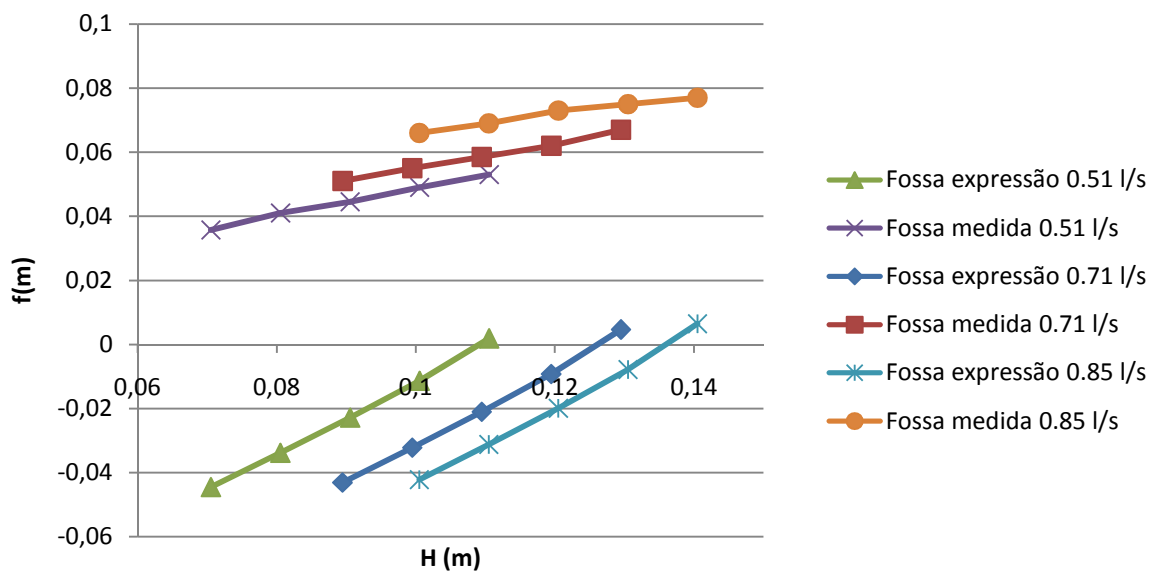


Figura VII.30. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Rubinstein

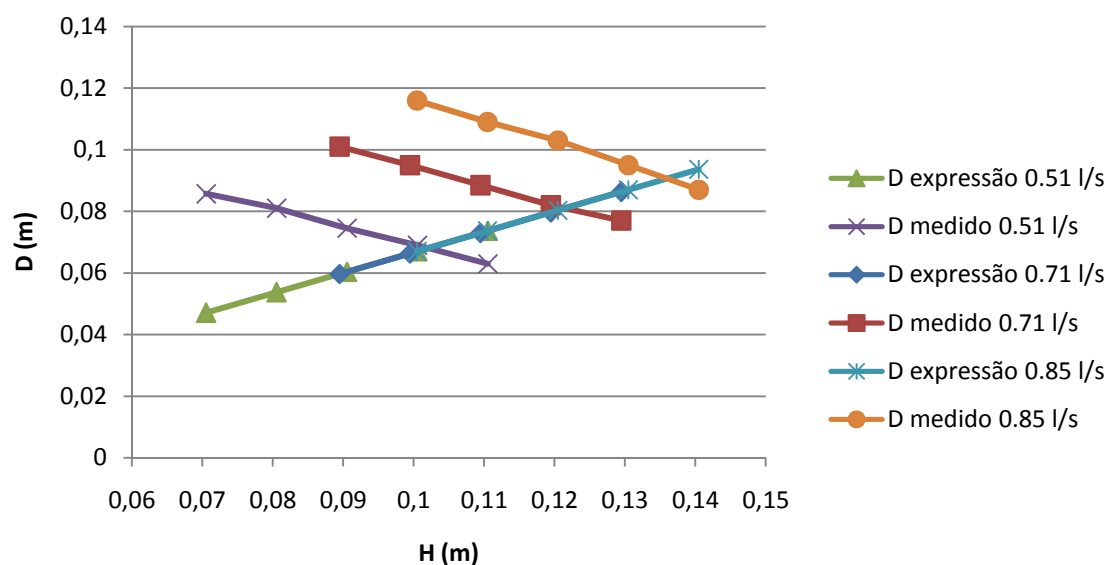
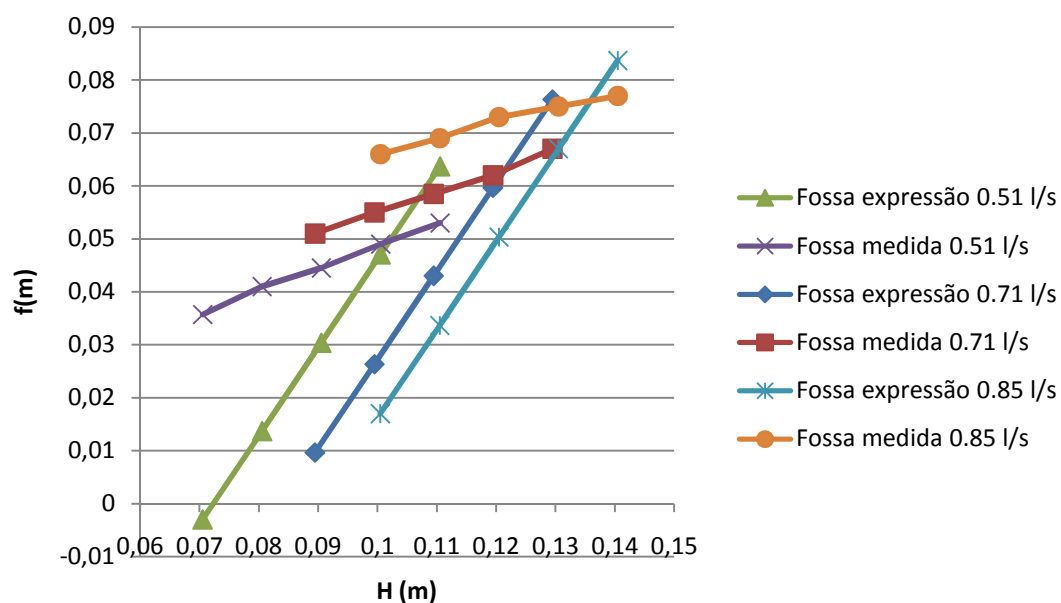
Quadro VII.20. - Valores D e f para a expressão de Ghodsian

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0118	0,0018	0,0146	0,0046	0,0164	0,0064
0,02	0,0087	-0,0113	0,0108	-0,0092	0,0122	-0,0078
0,03	0,0072	-0,0228	0,0090	-0,0210	0,0101	-0,0199
0,04	0,0062	-0,0338	0,0078	-0,0322	0,0088	-0,0312
0,05	0,0055	-0,0445	0,0069	-0,0431	0,0078	-0,0422

Figura VII.31. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de GhodsianFigura VII.32. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Ghodsian

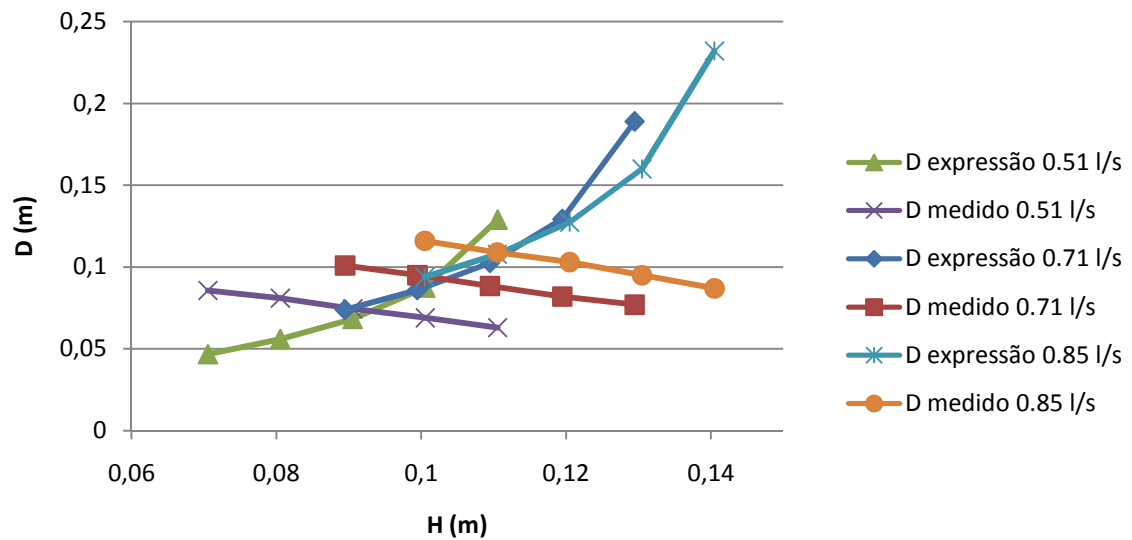
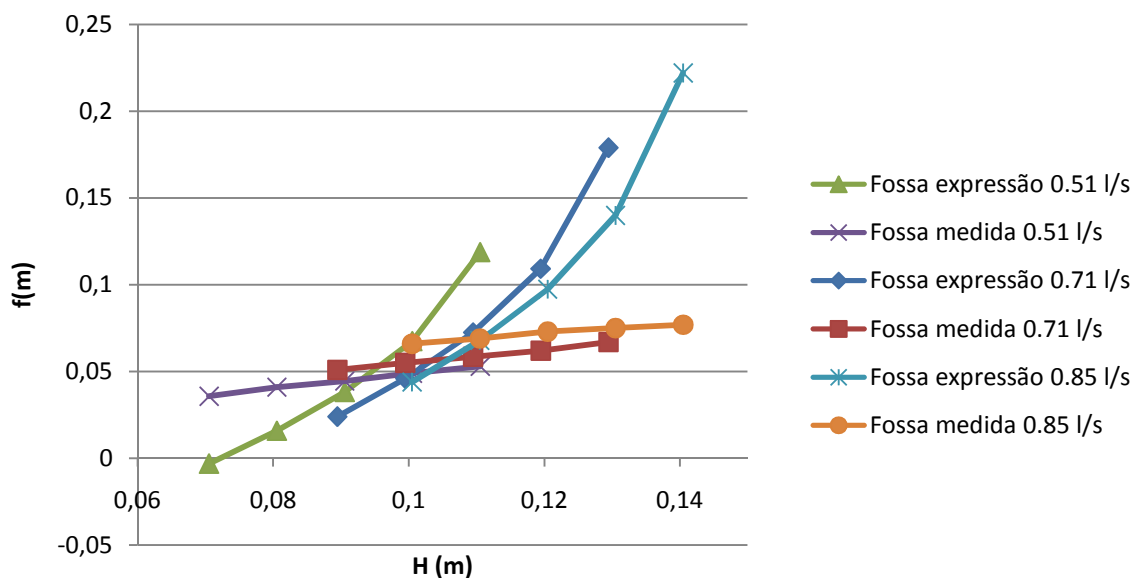
Quadro VII.21. - Valores D e f para a expressão de Davis-Sorensen

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,0737	0,0637	0,0863	0,0763	0,0937	0,0837
0,02	0,0670	0,0470	0,0797	0,0597	0,0870	0,0670
0,03	0,0604	0,0304	0,0730	0,0430	0,0803	0,0503
0,04	0,0537	0,0137	0,0663	0,0263	0,0737	0,0337
0,05	0,0470	-0,0030	0,0597	0,0097	0,0670	0,0170

Figura VII.33. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Davis-SorensenFigura VII.34. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Davis-Sorensen

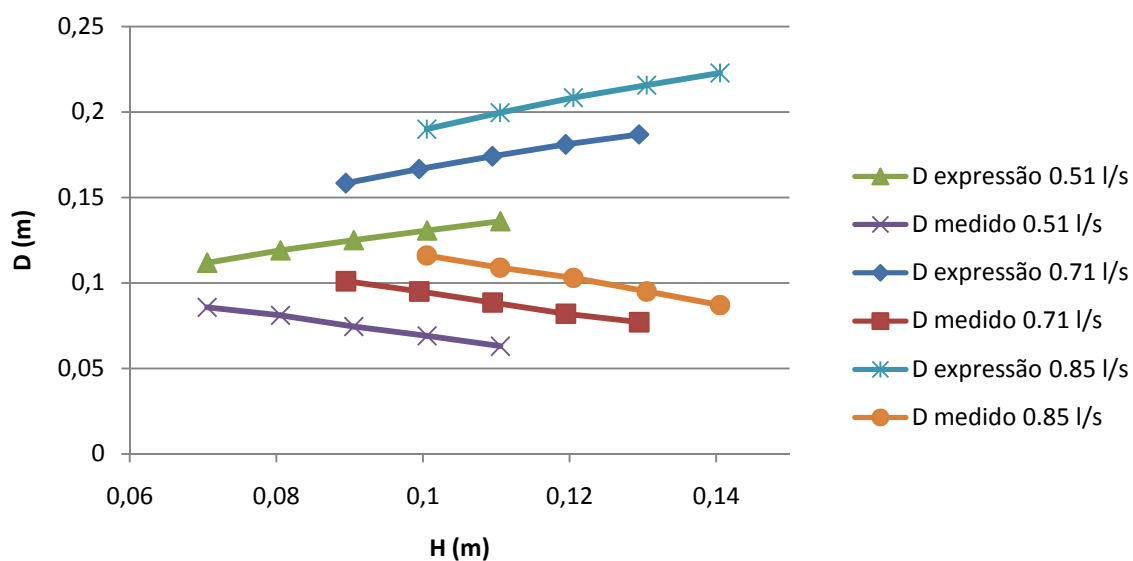
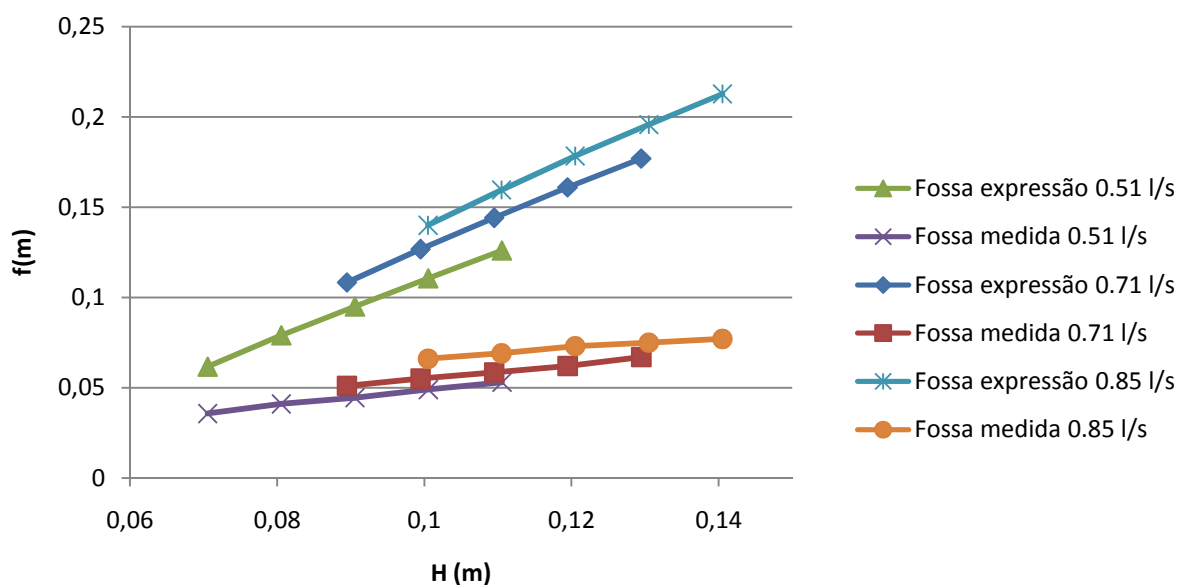
Quadro VII.22. - Valores D e f para a expressão de Mikhalev

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,1288	0,1188	0,1888	0,1788	0,2320	0,2220
0,02	0,0875	0,0675	0,1293	0,1093	0,1599	0,1399
0,03	0,0683	0,0383	0,1025	0,0725	0,1274	0,0974
0,04	0,0559	0,0159	0,0859	0,0459	0,1079	0,0679
0,05	0,0468	-0,0032	0,0739	0,0239	0,0940	0,0440

Figura VII.35. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de MikhalevFigura VII.36. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mikhalev

Quadro VII.23. - Valores D e f para a expressão de Mirtskhulava (A)

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,1361	0,1261	0,1869	0,1769	0,2228	0,2128
0,02	0,1306	0,1106	0,1809	0,1609	0,2157	0,1957
0,03	0,1250	0,0950	0,1740	0,1440	0,2084	0,1784
0,04	0,1191	0,0791	0,1667	0,1267	0,1995	0,1595
0,05	0,1117	0,0617	0,1583	0,1083	0,1899	0,1399

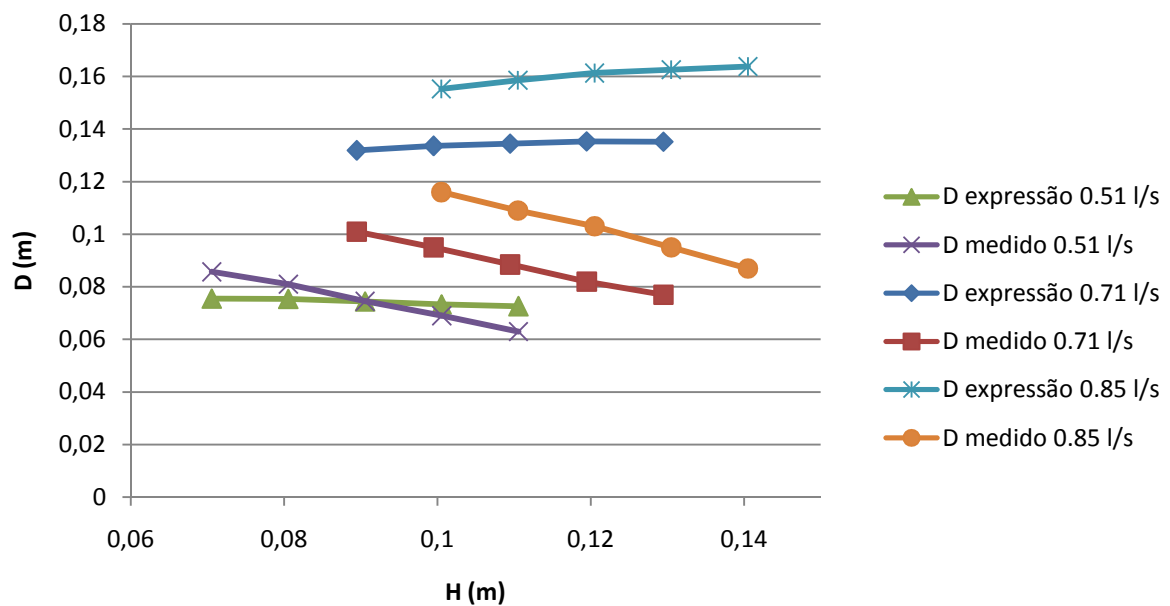
Figura VII.37. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Mirtskhulava (A)Figura VII.38. - Comparação de f_{expressão} com f_{medida} segundo a expressão de Mirtskhulava (A)

Quadro VII.24. - Valores de cálculo para a expressão de Mirtskhulava (B)

Q= 0,51 l/s			Q= 0,71 l/s			Q= 0,85 l/s			η	n1
γ_0 (N/m ³)	W (m/s)	b_0 (m)	γ_0 (N/m ³)	W (m/s)	b_0 (m)	γ_0 (N/m ³)	W (m/s)	b_0 (m)		
8337,46	0,1988	0,0128	8132,11	0,1851	0,0128	8047,45	0,1870	0,0136	1,5	0,7238

Quadro VII.25. - Valores D e f para a expressão de Mirtskhulava (B)

h (m)	Q= 0,51 l/s			Q= 0,71 l/s			Q= 0,85 l/s		
	D _{expressão} (m)	D _{corrigido} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	D _{corrigido} (m)	f _{expressão} (m)	D _{expressão} (m)	D _{corrigido} (m)	f _{expressão} (m)
0,01	0,1002	0,0726	0,0626	0,1868	0,1352	0,1252	0,2263	0,1638	0,1538
0,02	0,1014	0,0734	0,0534	0,1869	0,1353	0,1153	0,2246	0,1626	0,1426
0,03	0,1028	0,0744	0,0444	0,1858	0,1345	0,1045	0,2228	0,1613	0,1313
0,04	0,1042	0,0754	0,0354	0,1845	0,1335	0,0935	0,2190	0,1585	0,1185
0,05	0,1044	0,0756	0,0256	0,1821	0,1318	0,0818	0,2145	0,1553	0,1053

Figura VII.39. - Comparação de D_{expressão} com D_{medido} segundo a expressão de Mirtskhulava (B)

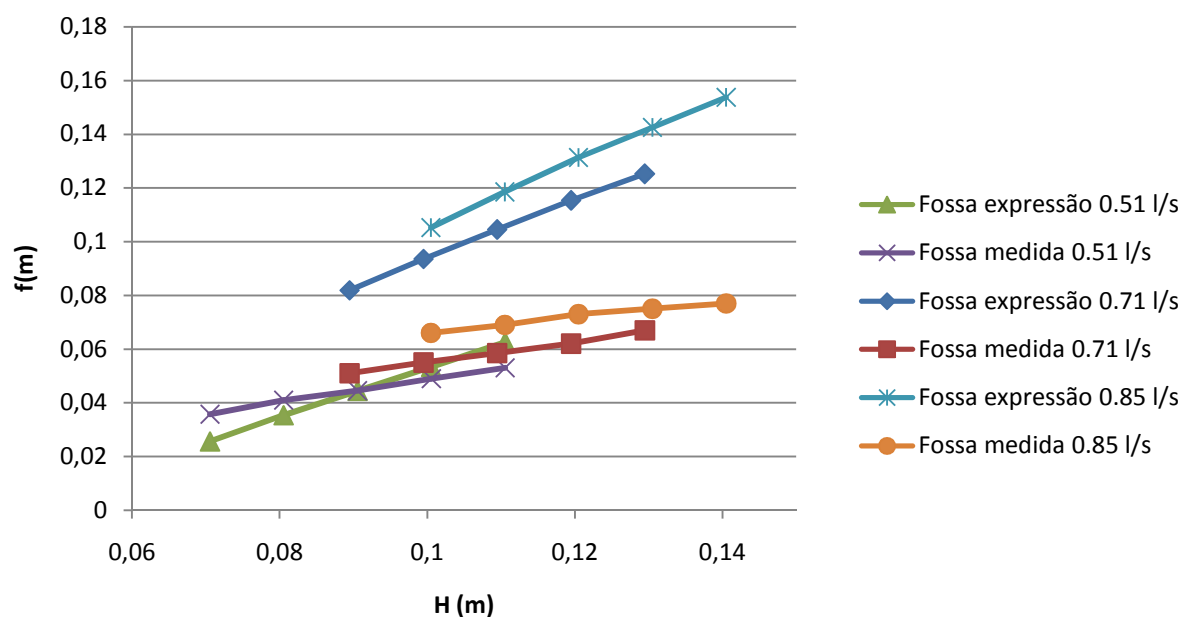


Figura VII.40. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Mirtskhulava (B)

Quadro VII.26. - Valores D e f para a expressão de Yildiz & Uzucek

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)
0,01	0,1106	0,1006	0,1368	0,1268	0,1537	0,1437
0,02	0,1082	0,0882	0,1343	0,1143	0,1511	0,1311
0,03	0,1057	0,0757	0,1317	0,1017	0,1484	0,1184
0,04	0,1030	0,0630	0,1289	0,0889	0,1456	0,1056
0,05	0,0999	0,0499	0,1258	0,0758	0,1425	0,0925

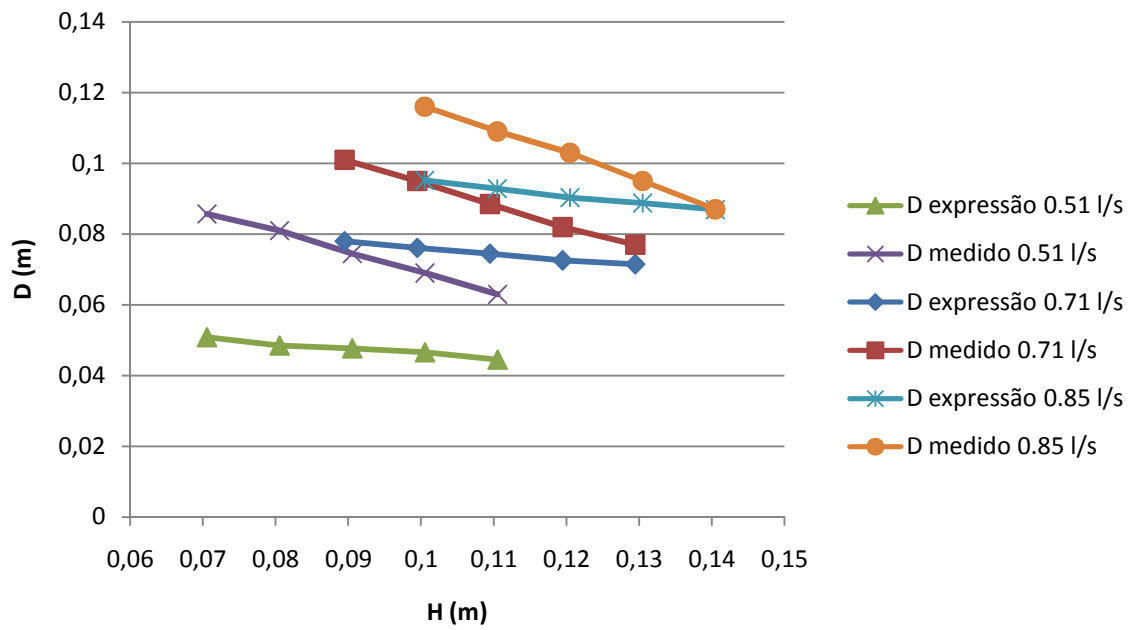


Figura VII.41. - Comparação de $D_{\text{expressão}}$ com D_{medido} segundo a expressão de Yildiz & Uzucek

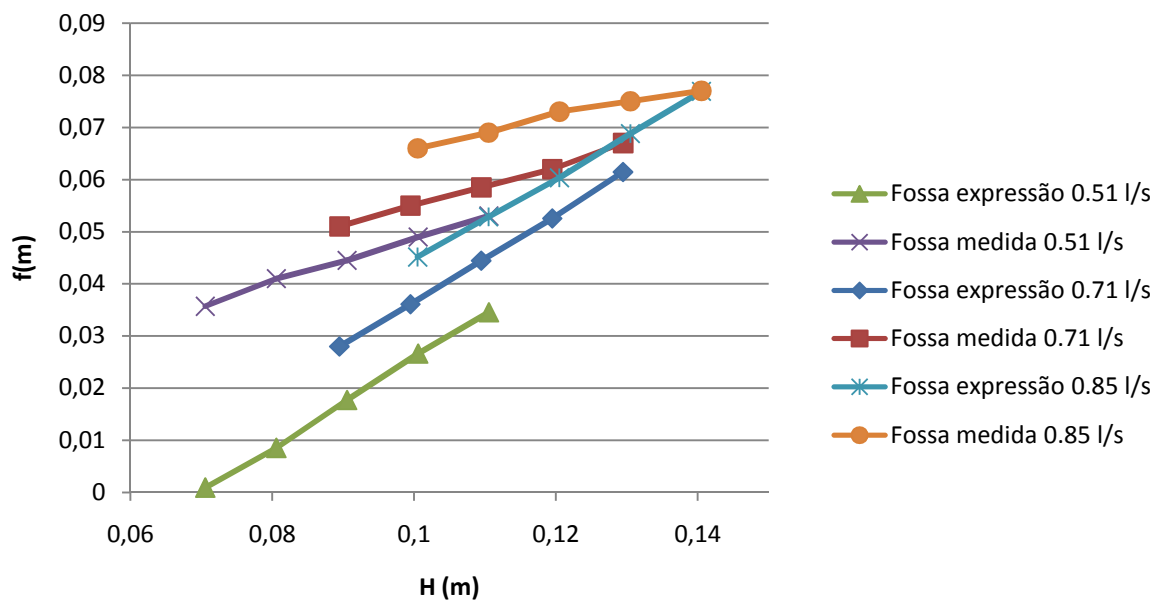


Figura VII.42. - Comparação de $f_{\text{expressão}}$ com f_{medida} segundo a expressão de Yildiz & Uzucek

Quadro VII.27. – Valores de $D_{\text{expressão}}$ e de $f_{\text{expressão}}$ segundo a expressão de Mason & Arumugam (B) com valor de K proposto

h (m)	Q= 0,51 l/s		Q= 0,71 l/s		Q= 0,85 l/s	
	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)	$D_{\text{expressão}}$ (m)	$f_{\text{expressão}}$ (m)
0,01	0,0640	0,0540	0,0769	0,0669	0,0852	0,0752
0,02	0,0715	0,0515	0,0859	0,0659	0,0951	0,0751
0,03	0,0766	0,0466	0,0919	0,0619	0,1018	0,0718
0,04	0,0806	0,0406	0,0967	0,0567	0,1070	0,0670
0,05	0,0841	0,0341	0,1008	0,0508	0,1114	0,0614

Anexo VIII

COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS/FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO COM AS FOSSAS DE EROSÃO VERIFICADAS



Figura VIII.1. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,51$ l/s e $h \approx 1$ cm)

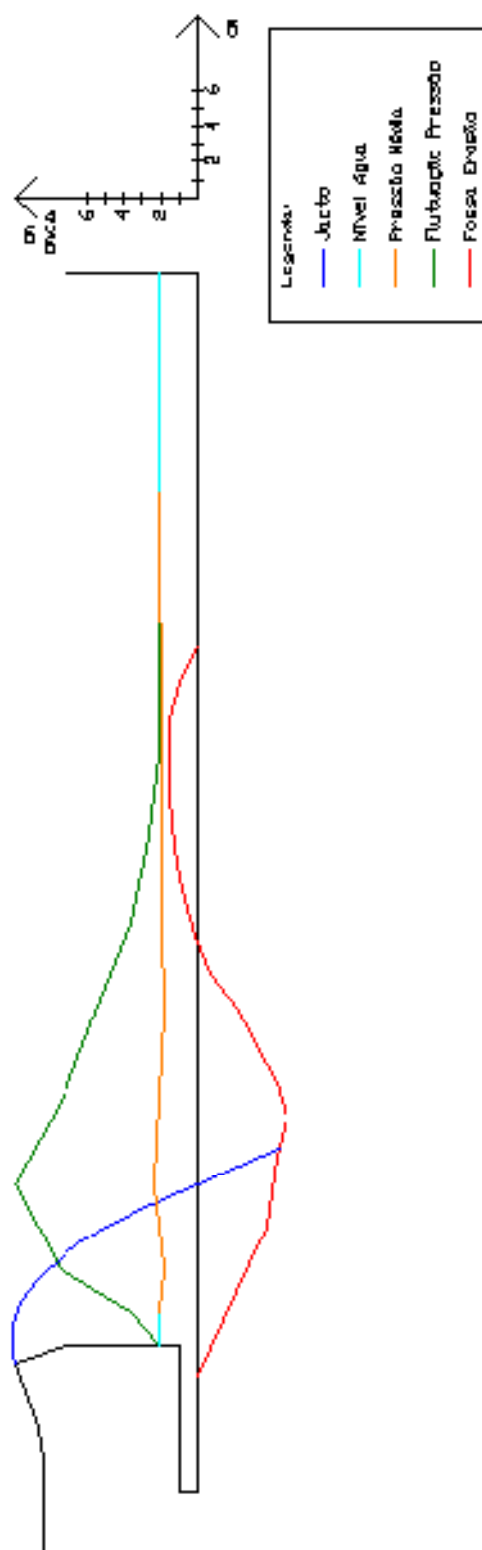


Figura VIII.2. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,51$ l/s e $h \approx 2$ cm)

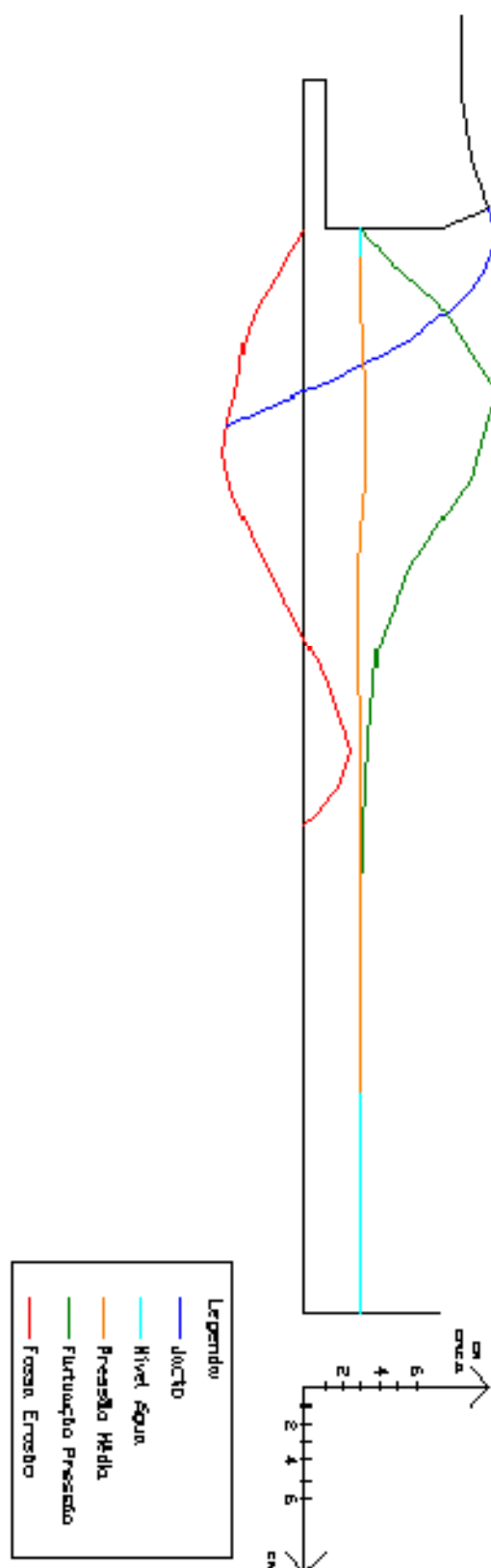


Figura VIII.3. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,51$ l/s e $h\approx 3$ cm)

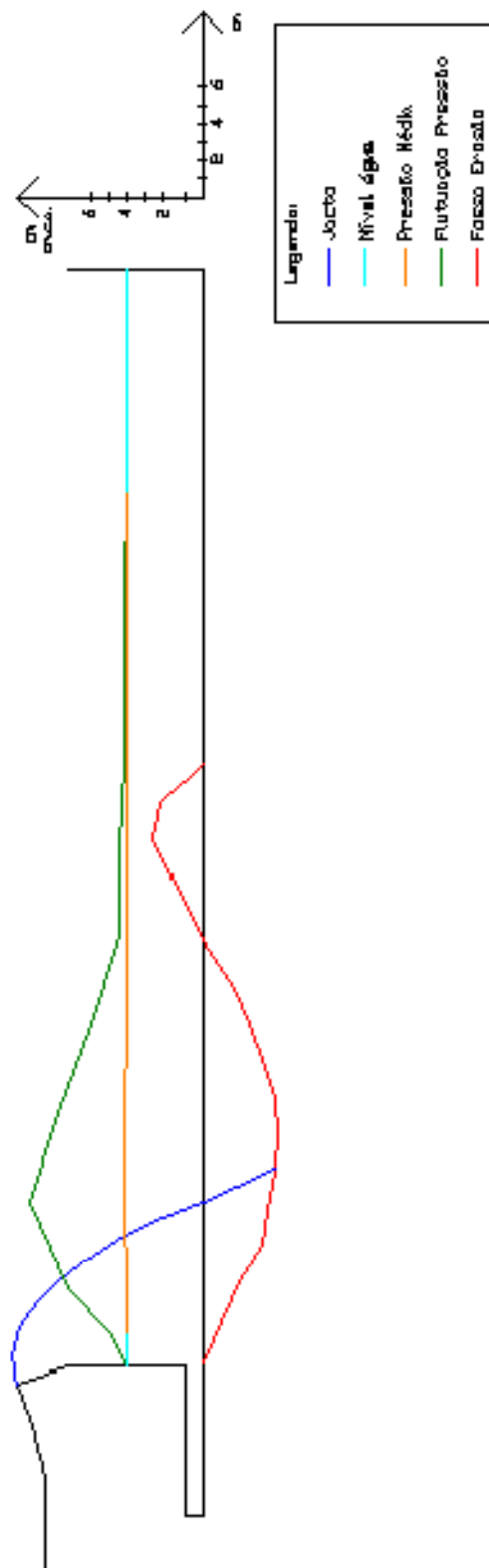


Figura VIII.4. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,51$ l/s e $h \approx 4$ cm)



Figura VIII.5. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,51$ l/s e $h \approx 5$ cm)



Figura VIII.6. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,85$ l/s e $h \approx 1$ cm)

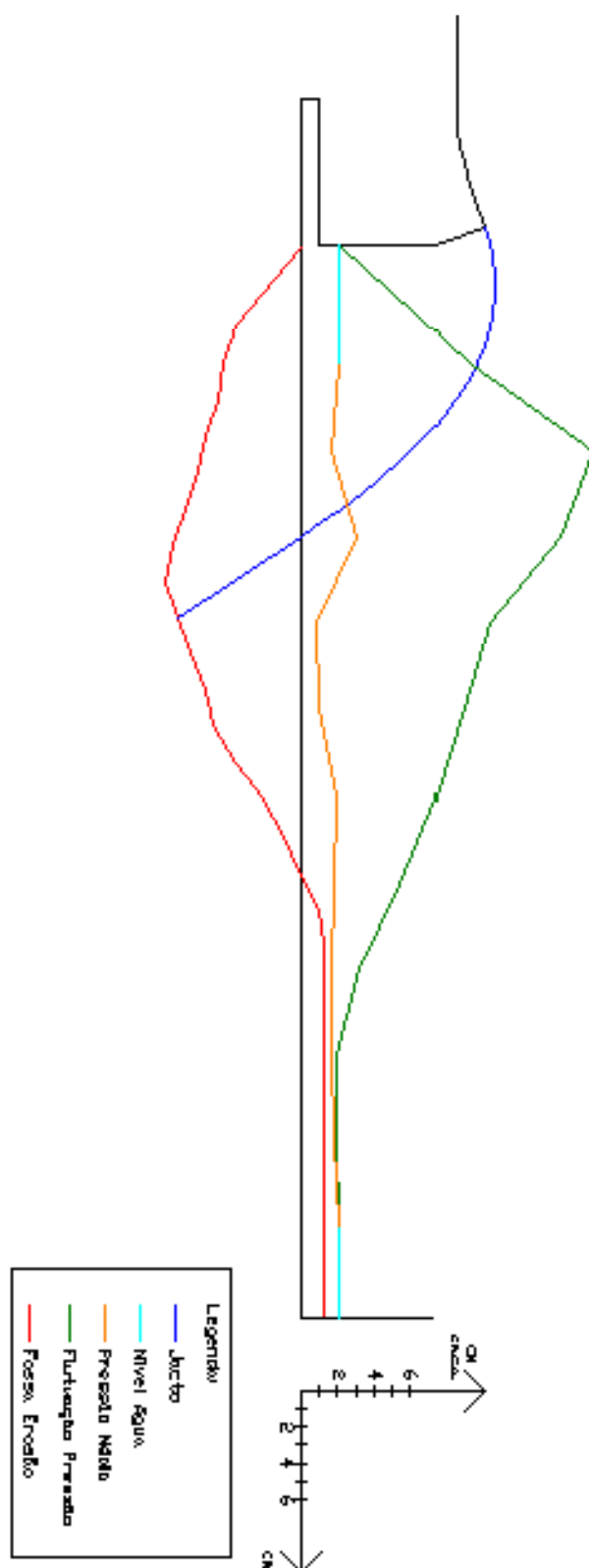


Figura VIII.7. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,85$ l/s e $h \approx 2$ cm)



Figura VIII.8. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,85 \text{ l/s}$ e $h \approx 3 \text{ cm}$)

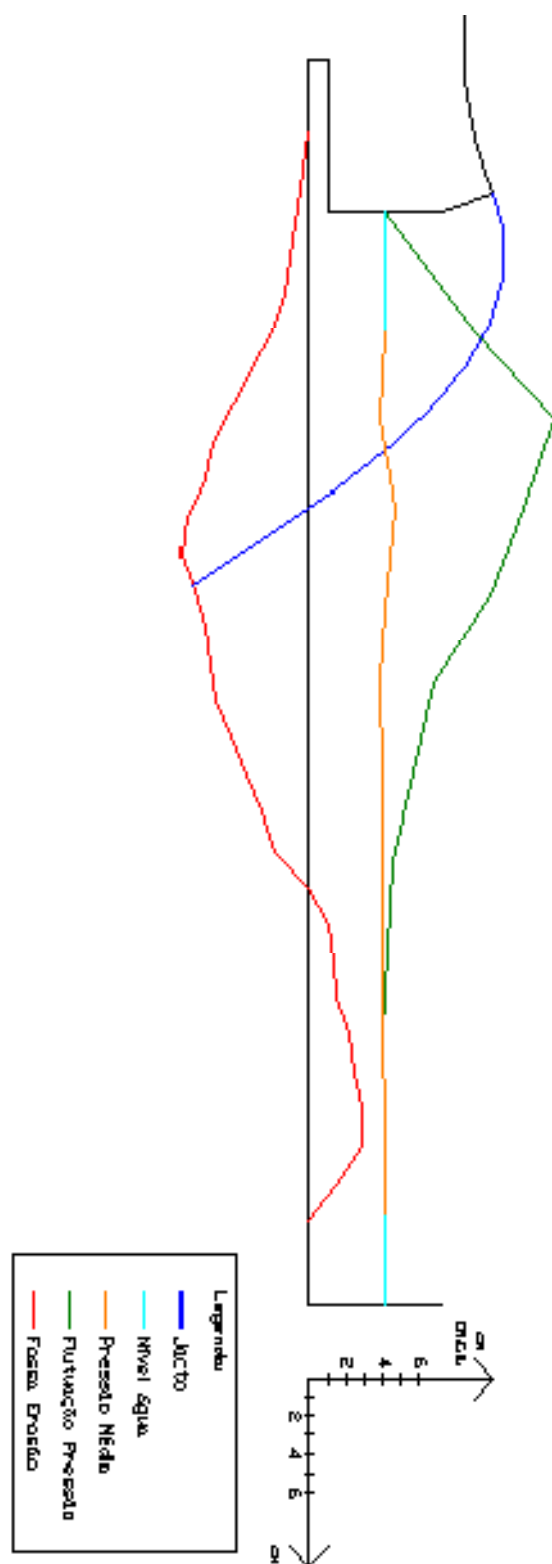


Figura VIII.9. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,85$ l/s e $h \approx 4$ cm)



Figura VIII.10. - Esquema representativo de fossas de erosão conjuntamente com valores de pressão média e flutuações de pressão ($Q=0,85$ l/s e $h \approx 5$ cm)

