

ESTUDO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE DESCARREGADORES NÃO CONVENCIONAIS

PEDRO MARK BARON MARINHO DE SOUSA

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

SETEMBRO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

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 - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

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.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a colaboração de um grande número de pessoas que, quer através da orientação técnica e científica como através do incentivo, amizade e apoio, toranaram esta experiência mais fácil, e sem as quais não seria possível ter tornado este projecto uma realidade. A estas pessoas pretendo exprimir o meu reconhecimento e eterno agradecimento. Correndo o risco de esquecimentos indesejáveis, 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 Eng.^a Luciana das Neves, ao Eng.^o Pedro Pinto e à Eng.^a Patricia Pereira pelo apoio prestado face às dificuldades encontradas ao longo deste trabalho;
- Ao Sr. Nelson e ao Sr. Aníbal pela criatividade, engenho e empenho na tentativa de auxiliar à procura da melhor solução técnica;
- À minha família, especialmente aos meus Pais e Irmão, pelos sacrifícios, pelo apoio e amor incondicionais, e por proporcionarem as melhores condições não só ao longo do meu percurso académico como em todos os momentos da minha vida;
- Aos meus amigos e colegas por todo o apoio prestado.

RESUMO

O presente trabalho centrou-se no estudo experimental, em modelo reduzido, da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de um descarregador não convencional.

Para o efeito 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.

Os ensaios foram realizados em duas fases. Numa primeira fase foi instalado um fundo fixo, sendo assim medidas as alturas de água na secção de início e de fim do ressalto hidráulico e à saída do descarregador. Foram ainda calculados os comprimentos dos ressaltos e perdas de energia, sendo estes valores comparados com valores teóricos resultantes de fórmulas existentes na literatura. A segunda fase consistiu na substituição do fundo fixo por fundo móvel, sendo utilizados três materiais distintos. Nesta fase foram feitos levantamentos dos perfis das fossas de erosão originadas pelo escoamento, sendo comparadas com valores obtidos através de fórmulas existentes na literatura. Foi ainda averiguada a possibilidade de a descarga se processar como um jacto, sendo feito um estudo referente a este tema.

Por fim foram tiradas conclusões tendo por base as características dos ressaltos hidráulicos formados, do jacto à saída do descarregador e das fossas de erosão geradas, tendo sido encontrada uma possível solução para a protecção do leito do curso de água no modelo em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Dissipação de energia, ressalto hidráulico, jacto, modelo reduzido, fossas de erosão

ABSTRACT

The present work is based on the experimental study, using a physical model, of the energy dissipation downstream of a stepped spillway by means of a hydraulic jump.

For this purpose, the instalment already available at the Laboratório de Hidráulica of the Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, of the Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto was used.

Experimental tests were carried out in two phases. The first phase consisted in using a fixed bed. Measurements were made of the flow height upstream and downstream of the hydraulic jump and at the exit section of the spillway. Furthermore, calculations were made to determine the hydraulic jump length and head loss. These results were then compared to theoretical values based on existing formulas. In the second phase, the fixed bed was substituted with a movable bed, in which three different materials were used. These experiments allowed for the creation of scour profiles due to erosion from the hydraulic jump. These results were also compared to theoretical values obtained from existing methods. Additionally, the possibility of comparing the discharge from the spillway as a jet was considered. This scenario was equally studied.

Finally, conclusions were made based on the characteristics of the hydraulic jump, as well as the scour profiles due to erosion. A potential solution to the problem of streambed erosion regarding this specific model was also found.

KEYWORDS: Energy dissipation, hydraulic jump, jet, scale model, scour

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
----------------------------	---

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	3
---------------------------------------	---

2.1. INTRODUÇÃO	3
------------------------------	---

2.2. DESCARGA DE CAUDAIS DE CHEIA	4
--	---

2.3. DESCARREGADORES DE CHEIAS	4
---	---

2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO	5
--	---

2.4.1. BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO	5
---	---

2.4.2. BACIAS DE DISSIPACÃO POR MACRORUGOSIDADES	6
--	---

2.4.3. BACIAS DE DISSIPACÃO POR JACTOS	7
--	---

2.4.3.1. Alcance e ângulos de incidência	8
--	---

2.4.3.2. Profundidade das fossas de erosão	9
--	---

2.4.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO	10
--	----

2.4.5. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO	11
---	----

2.4.5.1. Número de Froude	13
---------------------------------	----

2.4.5.2. Alturas conjugadas	14
-----------------------------------	----

2.4.5.3. Comprimento do rolo	14
------------------------------------	----

2.4.5.4. Comprimento do ressalto hidráulico	16
---	----

2.4.5.5. Dissipação de energia	20
--------------------------------------	----

2.4.5.6. Profundidade das fossas de erosão	22
--	----

2.4.5.7. Tapetes de protecção	23
-------------------------------------	----

2.4.5.8. Velocidade crítica de arrastamento	24
---	----

2.5. ESTUDO DA DISSIPACÃO DE ENERGIA A JUSANTE DO DESCARREGADOR DE DEGRAUS EM ESTUDO	26
---	----

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	27
3.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	27
3.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO	32
3.2.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS	32
3.2.2. MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA NO ESCOAMENTO	32
3.2.3. PROFUNDIDADE DAS FOSSAS DE EROSÃO	34
3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	35
3.4. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS	35
3.4.1. MEDIDOR DE CAUDAIS	33
3.4.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA	37
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	39
4.1. INTRODUÇÃO	39
4.2. CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO	39
4.3. ENSAIOS EM FUNDO FIXO	41
4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO – ALTURAS CONJUGADAS	42
4.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO – PERDA DE ENERGIA	43
4.3.3. CARACTERIZAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO – COMPRIMENTOS E LOCALIZAÇÃO	45
4.3.4. LOCALIZAÇÃO DO INÍCIO DO RESSALTO EM RELAÇÃO À SECÇÃO DE JUSANTE DO DESCARREGADOR	55
4.4. ENSAIOS EM FUNDO MÓVEL	56
4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS FOSSAS DE EROSÃO	57
4.4.2. ANÁLISE DAS FOSSAS DE EROSÃO CONSIDERANDO A ACÇÃO DE DESCARGA POR JACTO	64
4.4.3. ANÁLISE DAS FOSSAS DE EROSÃO CONSIDERANDO A ACÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO	70
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	77
BIBLIOGRAFIA	83
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. – Esquema de uma bacia de dissipação por impacto	6
Fig. 2.2. – Bacia de dissipação por impacto	6
Fig. 2.3. – Bacia de dissipação por jacto	8
Fig. 2.4. – Alcance do jacto	9
Fig. 2.5. – Funcionamento do trampolim submerso sem acessórios.....	11
Fig. 2.6. – Bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico propostas por USBR.....	12
Fig. 2.7. – Valores limite para cada tipo de bacia de dissipação por ressalto hidráulico.....	13
Fig. 2.8. – Comprimento do ressalto e do rolo	15
Fig. 2.9. – Fórmulas propostas para o comprimento do rolo	16
Fig. 2.10. – Relação entre o comprimento do ressalto hidráulico e o número de Froude	17
Fig. 2.11. – Fórmulas sugeridas para o comprimento do ressalto hidráulico	18
Fig. 2.12. – Comprimento do ressalto hidráulico.....	19
Fig. 2.13. – Energia específica em função da altura do escoamento	20
Fig. 2.14. – Relação entre a eficiência do ressalto e o número de Froude	21
Fig. 2.15. – Fórmulas sugeridas para o cálculo da perda de energia.....	22
Fig. 2.16. – Esquema da instalação experimental utilizada no estudo desenvolvido por Pagliara et al (2009)	23
Fig. 2.17. – Velocidade média crítica em função do diâmetro mediano	25
Fig. 2.18. – Ábaco de Hjülstrom	26
Fig. 3.1. – Modelo de descarregador de cheias e bacia de dissipação de energia.....	27
Fig. 3.2. – Esquema da instalação experimental	28
Fig. 3.3. – Pormenor de degraus no descarregador, na secção de largura constante.....	28
Fig. 3.4. – Bacia de dissipação	29
Fig. 3.5. – Comporta vertical de altura variável.....	30
Fig. 3.6. – Curva granulométrica da areia.....	30
Fig. 3.7. – Curva granulométrica da brita 5/15.....	31
Fig. 3.8. – Curva granulométrica da brita 9.5/19.....	31
Fig. 3.9. – Visor do equipamento de medição de caudais	32
Fig. 3.10. – Conjunto flutuador/potenciómetro	33
Fig. 3.11. – Esquema do conjunto flutuador/potenciómetro	33
Fig. 3.12. – Régua para levantamento dos perfis das fossas de erosão fixada em posição.....	34
Fig. 3.13. – Esquema traduzindo as variáveis envolvidas no cálculo das profundidades de erosão	34

Fig. 3.14. – Placa de aquisição de dados.....	35
Fig. 3.15. – Curva de calibração do equipamento de medição de caudais	36
Fig. 4.1. – Esquema representativo dos regimes de escoamento observados ao longo do canal descarregador.....	41
Fig. 4.2. – Comparação de valores de D_2 medidos com valores teóricos.....	43
Fig. 4.3. – Ábaco para o cálculo do comprimento do ressalto hidráulico	
Fig. 4.4. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico	48
Fig. 4.5. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico	49
Fig. 4.6. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico	50
Fig. 4.7. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico	51
Fig. 4.8. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo	53
Fig. 4.9. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo	54
Fig. 4.10. – Perfil das fossas de erosão relativas ao leito em areia.....	57
Fig. 4.11. – Perfil das fossas de erosão relativas ao leito em areia.....	58
Fig. 4.12. – Perfil das fossas de erosão relativas ao leito em areia.....	58
Fig. 4.13. – Comprimento das fossas de erosão verificadas no leito composto por areia, face à localização do fim do ressalto	62
Fig. 4.14. – Comprimento das fossas de erosão verificadas no leito composto por brita 5/15, face à localização do fim do ressalto	63
Fig. 4.15. – Comprimento das fossas de erosão verificadas no leito composto por brita 9.5/19, face à localização do fim do ressalto	63
Fig. 4.16. – Perfis das fossas de erosão relativas ao leito composto por areia face à trajectória do jacto de saída	68
Fig. 4.17. – Perfis das fossas de erosão relativas ao leito composto por areia face à trajectória do jacto de saída	69
Fig. 4.18. – Perfis das fossas de erosão relativas ao leito composto por areia face à trajectória do jacto de saída	69
Fig. 4.19. – Relação entre F_{d90} e z_{max} para os três materiais	71
Fig. 4.20. – Relação entre F_{d90} e z_{max} , admitindo as duas britas como um material único	72
Fig. 4.21. – Curvas granulométricas dos materiais granulares utilizados no fundo móvel	73

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. – Coeficientes para o cálculo da profundidade das fossas de erosão	10
Quadro 3.1. – Características dos materiais granulares.....	31
Quadro 3.2. – Dados relativos à calibração do medidor de caudais	36
Quadro 4.1. – Condições de escoamento em modelo.....	40
Quadro 4.2. – Condições de escoamento em protótipo	40
Quadro 4.3. – Parâmetros necessários para a caracterização do ressalto	42
Quadro 4.4. – Perdas de energia	44
Quadro 4.5. – Comparação da perda de energia no ressalto hidráulico com valores teóricos	44
Quadro 4.6. – Comparação da eficiência da perda de energia no ressalto hidráulico com valores teóricos	45
Quadro 4.7. – Comprimentos para o ressalto hidráulico	47
Quadro 4.8. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido	48
Quadro 4.9. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido	49
Quadro 4.10. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido	50
Quadro 4.11. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido	51
Quadro 4.12. – L_j segundo Simões e Porto e comparação com $L_{j\text{medido}}$	52
Quadro 4.13. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico	52
Quadro 4.14. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo	53
Quadro 4.15. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo	54
Quadro 4.16. – Alcance e ângulo de incidência do jacto	55
Quadro 4.17. – Secção inicial dos ressaltos face ao alcance máximo do jacto	56
Quadro 4.18. – Exemplo de levantamento de perfil para o caudal de 0.51 l/s	59
Quadro 4.19. – Profundidades máximas das fossas de erosão para o leito em areia	60
Quadro 4.20. – Profundidades máximas das fossas de erosão para o leito em brita 5/15	60
Quadro 4.21. – Profundidades máximas das fossas de erosão para o leito em brita 9.5/19	61
Quadro 4.22. – Comprimentos das fossas de erosão, L_f , face à localização da secção correspondente ao fim do ressalto hidráulico.....	62
Quadro 4.23. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito em areia	65
Quadro 4.24. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito em brita 5/15	65

Quadro 4.25. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito em brita 9.5/19	66
Quadro 4.26. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito de areia segundo Martins	66
Quadro 4.27. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito de brita 5/15 segundo Martins	67
Quadro 4.28. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito de brita 9.5/19 segundo Martins	67
Quadro 4.29. – Localização da secção de profundidade máxima da fossa de erosão	68
Quadro 4.30. – Profundidades máximas teóricas das fossas de erosão	70
Quadro 4.31. – Valores característicos de um eventual material que conduziu a uma fossa de erosão nula	72
Quadro 4.32. – Parâmetros característicos dos materiais	73
Quadro 4.33. – Velocidades de escoamento nas secções imediatamente a montante e a jusante do ressalto hidráulico, em modelo e em protótipo	75
Quadro 4.34. – Comparação entre a velocidade crítica de arrastamento e a maior velocidade verificada no escoamento	76

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – desnível entre a soleira da secção onde se pretende medir a altura de escoamento e o centro de rotação do potenciómetro [m]

a – distância horizontal desde o início do canal até aos pontos de medida do perfil da fossa de erosão [m]

D – profundidade máxima da fossa de erosão medida a partir da superfície livre do colchão de água na secção de impacto do jacto [m]

D₁ – altura do escoamento na secção de montante do ressalto hidráulico [m]

D₂ – altura do escoamento na secção de jusante do ressalto hidráulico [m]

D_{2_{medido}} – altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico medida experimentalmente [m]

D_{2_{teórico}} – altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico obtida através da expressão de Bélanger [m]

d_i – diâmetro de peneiração em que há passagem de i%, em peso, da amostra de material do leito [m]

D_{max} – profundidade máxima da fossa de erosão medida a partir da superfície livre do colchão de água na secção de impacto do jacto, medida experimentalmente [m]

D_{teórico} – profundidade máxima da fossa de erosão medida a partir da superfície livre do colchão de água na secção de impacto do jacto, segundo Martins [m]

e – desnível entre a soleira da secção onde se pretende medir a altura de escoamento e o fundo do flutuador [m]

E₁ – energia específica na secção de montante do ressalto hidráulico [m]

E₂ – energia específica na secção de jusante do ressalto hidráulico [m]

EDT – escoamento deslizante sobre turbilhões

EQS – escoamento por quedas sucessivas

F – distância medida na vertical entre a face superior da estrutura de suporte das varetas e o perfil do leito após erosão [m]

f – factor de resistência

f – profundidade da fossa de erosão medida a partir do leito inicial do canal [m]

F_{d90} – número de Froude da partícula, para o diâmetro característico d₉₀

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fr₁ – número de Froude na secção de montante do ressalto hidráulico

g – aceleração gravítica [m/s²]

h – altura do escoamento para aplicação do critério de Neill

h – espessura do colchão de água na secção de impacto do jacto [m]

H – queda [m]

h_0 – altura do escoamento a jusante da fossa de erosão [m]

H_0 – queda na secção de saída do descarregador [m]

h_1 – altura do escoamento a montante da fossa de erosão [m]

H_1 – desnível entre a soleira do último degrau do descarregador e a superfície livre do colchão de água na secção de impacto do jacto [m]

H_{dam} – desnível entre o leito do canal e a crista do descarregador [m]

K – coeficiente adimensional das fórmulas de previsão da profundidade máxima das fossas de erosão

L – comprimento da vareta do conjunto flutuador/potenciómetro [m]

L_i – distância, na horizontal, desde a secção de saída do descarregador até ao início do ressalto hidráulico [m]

L_j – comprimento do ressalto hidráulico [m]

$L_{\text{jábaco}}$ – comprimento do ressalto obtido através da aplicação do ábaco de Peterka [m]

L_{jmedido} – comprimento do ressalto hidráulico medido nos ensaios realizados [m]

L_r – comprimento do rolo [m]

L_t – alcance teórico do jacto [m]

$L_{t_{\text{max}}}$ – alcance da extremidade de jusante do jacto [m]

L_{total} – distância desde a secção de saída do descarregador até à secção de jusante do ressalto hidráulico [m]

$L_{z_{\text{max}}}$ – distância, na horizontal, entre o início do canal e o ponto de profundidade máxima da fossa de erosão [m]

N – parâmetro de cálculo da fórmula de Martins

Q – caudal [m^3/s]

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

S_0 – inclinação da soleira do descarregador

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

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

TRA – escoamento de transição

U_0 – velocidade média do escoamento na secção de saída do descarregador [m/s]

U_1 – velocidade média do escoamento na secção de montante do ressalto hidráulico [m/s]

U_2 – velocidade média do escoamento na secção de jusante do ressalto hidráulico [m/s]

U_{cr} – velocidade crítica de arrastamento [m/s]

x, y – coordenadas do jacto [m]

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

$z_{\max}$ – profundidade máxima da fossa de erosão medida a partir do leito inicial do canal [m]

α – ângulo entre a vareta do conjunto flutuador/potenciômetro e a vertical [graus]

γ – peso específico da água [N/m^3]

γ_s – peso específico do material utilizado no fundo móvel [N/m^3]

ΔH – perda de energia no ressalto hidráulico [m]

η – eficiência da dissipação de energia no ressalto hidráulico [%]

θ – ângulo de saída do jacto [graus]

θ' – ângulo de incidência teórico do jacto no colchão de água [m]

ρ – massa específica da água [kg/m^3]

ρ_s – massa específica do material utilizado no fundo móvel [kg/m^3]

Ψ_1, Ψ_2 – parâmetros para cálculo do comprimento do ressalto hidráulico através da fórmula de Simões e Porto

1

INTRODUÇÃO

O presente estudo foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular Dissertação em Hidráulica, do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este trabalho constitui a dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica.

Um dos assuntos de maior importância na construção de um aproveitamento hidráulico é a forma como é feita a restituição ao curso de água natural dos caudais de cheia nele ocorrentes. A construção de bacias de dissipação requer assim grande atenção por parte da entidade responsável pelo projecto. De entre os vários tipos de estruturas de dissipação de energia, as bacias de dissipação por ressalto hidráulico têm sido largamente utilizadas. São em geral bacias de dissipação constituídas por ensoleiramentos de betão, que protegem o leito do curso de água da acção das descargas de caudais e que podem ou não ser munidos de acessórios especiais, cuja finalidade é manter o ressalto dentro da extensão de leito protegida.

No presente trabalho fez-se o estudo, por via experimental, em modelo reduzido, do fenómeno de dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de um descarregador não convencional de degraus. Para o efeito foram realizados ensaios no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde já se encontrava disponível um modelo do descarregador de cheias de degraus. Foi construído para o presente estudo um canal de restituição, com largura igual à da secção de jusante do descarregador, situado no reservatório de recepção de caudais descarregados, já existente na instalação. O referido canal foi utilizado como bacia de dissipação de energia das descargas de caudais de cheia, por ressalto hidráulico. As condições de ocorrência do ressalto hidráulico, para cada caudal descarregado nessa bacia, foram criadas através da possibilidade de controlar o nível de água na restituição, por meio de uma comporta situada a jusante do reservatório anteriormente referido.

Os principais objectivos do trabalho experimental consistiram:

- No estudo das características do escoamento na secção de saída do descarregador e do do ressalto hidráulico ocorrido, para cada um dos caudais consideradas, em condições de fundo fixo e subsequente análise dos seus efeitos quando ocorrendo em leitos móveis da bacia de dissipação. Na definição, com base nas conclusões retiradas dos estudos anteriores, de uma solução de protecção do leito da bacia de dissipação.

Foram realizados ensaios em fundo fixo e fundo móvel. Os ensaios foram realizados com equipamentos de medida e aquisição e tratamento de dados já existentes no Laboratório de Hidráulica, sendo estes adaptados às situações em estudo, conforme necessário.

Os ensaios em fundo fixo permitiram a caracterização dos ressaltos hidráulicos formados, para cada caudal escoado, através dos diferentes parâmetros que os caracterizam. Estas características tiveram aplicação prática na fase de ensaios em fundo móvel. Após a conclusão dos ensaios em fundo fixo, este foi substituído por um fundo móvel. Os ensaios em fundo móvel foram realizados considerando as mesmas condições de escoamento que as utilizadas para os estudos em fundo fixo e com três leitos distintos, constituídos por três materiais não coerentes, de granulometrias sucessivamente crescentes. Foram analisadas as características das fossas de erosão criadas para os três materiais, sendo as suas dimensões analisadas e posteriormente comparadas com valores calculados através de expressões propostas por vários autores.

A observação das condições de escoamento na secção de jusante do descarregador levaram ainda a um estudo adicional em que se considerou a possibilidade de relacionar esse escoamento com uma descarga por jacto. As dimensões e localização das fossas de erosão foram assim estudadas de um ponto de vista diferente, tendo-se neste caso em conta expressões existentes, relativas à descarga por jacto e sugeridas por diferentes autores.

A análise dos resultados dos ensaios realizados no que se refere a características do ressalto hidráulico para as diferentes condições de escoamento e acomportamento dos diferentes materiais do leito da bacia de dissipação permitiu a definição de uma possível solução para um tapete de protecção de fundos a colocar na bacia de dissipação de energia das descargas provenientes do descarregador de degraus.

O presente trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos.

Após o presente capítulo onde foi apresentado um enquadramento do tema e um breve resumo dos trabalhos a desenvolver, surge o segundo capítulo onde se faz um enquadramento geral da teoria que fundamenta o tema em estudo e se apresenta a pesquisa bibliográfica levada a cabo para posterior análise dos resultados experimentais do presente estudo.

No terceiro capítulo é feita a descrição da instalação experimental utilizada no presente estudo e dos equipamentos de medida e sistema de aquisição de dados usados nos ensaios.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados obtidos através dos ensaios realizados, bem como uma análise crítica destes.

No quinto capítulo são retiradas as conclusões do presente trabalho, e apresentam-se ainda sugestões para trabalhos futuros a desenvolver.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo far-se-á referência às noções teóricas envolvidas no desenvolvimento do estudo da dissipação de energia a jusante de um descarregador de degraus. Após breves considerações sobre a descarga de caudais de cheia e sobre a importância da dissipação da energia dessa descargas, far-se-á referência a tipos de descarregadores e bacias de dissipação vulgarmente utilizados. Em virtude do objecto do presente estudo ser o estudo da dissipação por ressalto hidráulico será dado especial ênfase à caracterização deste tipo de escoamento. Tendo em atenção as características do descarregador em estudo e, particularmente, a forma como o escoamento se processa na sua secção de jusante, assemelhando-se a um jacto proveniente do último degrau, referir-se-ão igualmente noções relacionadas com este tipo de descarga. Serão citados vários estudos sobre a dissipação de energia nesses tipos de escoamento, realizados por vários autores, bem como as respectivas conclusões. Tendo em vista que um dos objectivos principais do presente estudo é a definição de uma solução para protecção do leito da bacia de dissipação a jusante do descarregador, que possa permitir a descarga de caudais sem alteração desse leito, far-se-á referência a tapetes de protecção por meio de filtros invertidos, referindo-se igualmente critérios para definição da camada de enrocamento final de forma a conferir-lhe características que permitam evitar o seu arrastamento pelo escoamento.

2.2. DESCARGA DE CAUDAIS DE CHEIAS

A descarga de caudais de cheias é assunto de extrema importância na construção de aproveitamentos hidráulicos. Com a construção de uma barragem, é criada uma obra de retenção, que por sua vez resulta numa diferença entre a carga hidráulica das superfícies livres a montante e a jusante do aproveitamento, que originará a necessidade de dissipação de energia quando ocorre a descarga de caudais de cheia. Dependendo do tipo de descarregador instalado, há um vasto espectro de valores para a energia a dissipar no final deste dispositivo. Em geral, e com a excepção de alguns tipos de descarregadores como por exemplo os descarregadores de degraus, a energia dissipada ao longo das soleiras descarregadoras é mínima, pelo que a jusante destas ainda se verifica a existência de valores demasiado elevados de energia, para que a restituição ao canal de jusante seja feita sem risco de qualquer alteração no leito e margens desse mesmo canal. Esta situação pode então originar fenómenos de instabilidade devido ao escoamento turbulento desenvolvido, prejudiciais tanto para o leito do rio como para as suas margens, causando a sua degradação, como ainda para o próprio aproveitamento, pondo em causa a sua integridade estrutural. Pretende-se em qualquer caso que o escoamento a jusante do descarregador assuma o mais rapidamente possível características o mais semelhante possível ao regime natural do curso de água. De modo efectuar a restituição de forma

segura é então imperativa a instalação dum órgão de dissipação de energia e protecção do leito, de modo a assegurar a integridade de quaisquer obras existentes na sua envolvente, bem como impedir erosões inadmissíveis do próprio leito.

A dissipação da energiado escoamento pode processar-se de várias formas:

- Atrito do escoamento com as fronteiras;
- Turbulência do escoamento;
- Atrito e emulsão de jactos com o ar;
- Impacto e atrito de jactos com a lâmina de água a jusante ou com o próprio leito do curso de água ou eventualmente com uma estrutura projectada para o efeito.

Na impossibilidade de impedir que ocorram erosões do leito, deve-se controlar que estas se processem a uma distância suficiente da obra e das suas fundações para não porem em causa a segurança da obra.

No processo de dissipação de energia, a turbulência é o factor mais importante. Esta pode ser caracterizada como a transformação de energia cinética do escoamento em energia interna. O escoamento turbulento origina a formação de turbilhões, sendo a energia cinética do fluxo transferida para estes. A interferência destes turbilhões originará turbilhões sucessivamente mais pequenos, para os quais é transferida a energia proveniente dos anteriores, até que se formem turbilhões suficientemente pequenos para que a energia seja dissipada por atrito viscoso. O fenómeno descrito pode potencialmente causar grandes problemas, uma vez que implica grandes flutuações e picos de pressão.

De entre as ocorrências indesejáveis destaca-se:

- Cavitação, que ocorre quando a pressão local decresce para valores abaixo da pressão de vapor do líquido que se escoar;
- Vibração, que ocorre devido à natureza turbulenta do escoamento;
- Escavações e erosões devidas ao levantamento e transporte de material;
- Acções hidrodinâmicas importantes sobre os contornos do escoamento.

2.3.DESCARREGADORES DE CHEIAS

Como referido anteriormente, descarregadores de cheias são órgãos de extrema importância para o funcionamento duma barragem. Estas estruturas têm a função de descarregar os caudais excessivos afluentes ao aproveitamento, de modo a garantir que não sejam ultrapassadas determinadas cotas fixadas de acordo com as características do aproveitamento e as imposições ambientais, sociológicas ou outras da zona envolvente Estes caudais deverão ser descarregados , de modo a não causar quaisquer danos quer na estrutura do aproveitamento quer na zona de restituição a jusante , salvaguardando assim as condições de funcionamento do aproveitamento em segurança.

Em caso de cheia, o descarregador tem a função de conduzir de forma eficiente o caudal de cheia de montante para jusante do aproveitamento, garantindo que os níveis de água máximos previstos, a montante, não sejam ultrapassados. É também essencial que as condições de escoamento a jusante sejam as mais aproximadas possível ao escoamento natural do curso de água, antes da construção da barragem.

Existem vários tipos de descarregadores, cada um com características específicas. O tipo de descarregador a instalar numa dada barragem é função do tipo da própria barragem na qual se insere, das características topográficas do local de implantação da obra e dos valores dos caudais a descarregar, estando estes últimos intimamente relacionados com o regime hidrológico do rio.

De entre os vários tipos de descarregadores, destaca-se o descarregador não convencional em degraus, sendo este o tipo modelado na instalação experimental utilizada no presente estudo. O referido tipo de descarregador tem a propriedade de dissipar grande parte da energia proveniente do escoamento na própria soleira. Uma vez que ocorre uma redução considerável da energia do escoamento no próprio canal, esta solução tem ainda vantagens económicas, uma vez que poderá, eventualmente, ser assim necessário um investimento substancialmente mais reduzido para a bacia de dissipação, face a descarregadores convencionais.

2.4.BACIAS DE DISSIPACÃO

As bacias de dissipação são, como o nome indica, estruturas cuja finalidade é a dissipação da energia do escoamento proveniente do descarregador. A diferença entre as superfícies livres a montante e a jusante do aproveitamento hidráulico originam geralmente, a jusante, escoamentos em regime rápido (ou supercrítico) com valores elevados da energia cinética. Sem atenuação desta energia, este escoamento, de elevada velocidade, causaria erosões no curso de água ao longo do tempo, podendo eventualmente levar à degradação do solo de fundação. Desta forma, os órgãos de dissipação têm frequentemente também a função de proteger o leito do rio de modo a impedir que ocorram escavações e erosões prejudiciais para a segurança da barragem. Tal como no caso dos descarregadores, existem diversos tipos de bacias de dissipação. O tipo de órgão de dissipação de energia a instalar depende fundamentalmente do tipo de aproveitamento em causa, das características topográficas e geológicas do local, bem como dos valores dos caudais a escoar. É de referir que na escolha do tipo de bacia de dissipação a construir há que ter em conta diversos aspectos de natureza económica e também ambiental.

Descrevem-se a seguir, sucintamente, alguns tipos de bacias de dissipação.

2.4.1.BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO

Este tipo de bacia de dissipação é, geralmente, utilizado em descargas provenientes de condutas sob pressão. Pode, no entanto, ser adaptado a escoamentos com superfície livre, mediante algumas alterações. A bacia de dissipação é composta por uma estrutura rectangular, semelhante a uma caixa, com uma viga posicionada com o eixo longitudinal na perpendicular ao sentido do escoamento, em frente à secção de saída de água. Este tipo de bacia de dissipação tem a particularidade de não requerer qualquer colchão de água a jusante, sendo grande parte da energia dissipada directamente no impacto do jacto de água com a referida viga, havendo, no entanto, por vezes necessidade de colocar a jusante uma proteção do leito, como indicado na figura (2.1). Peterka (1958) determinou que este tipo de dispositivo de dissipação de energia é mais eficiente do que uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, para escoamentos com o mesmo número de Froude.

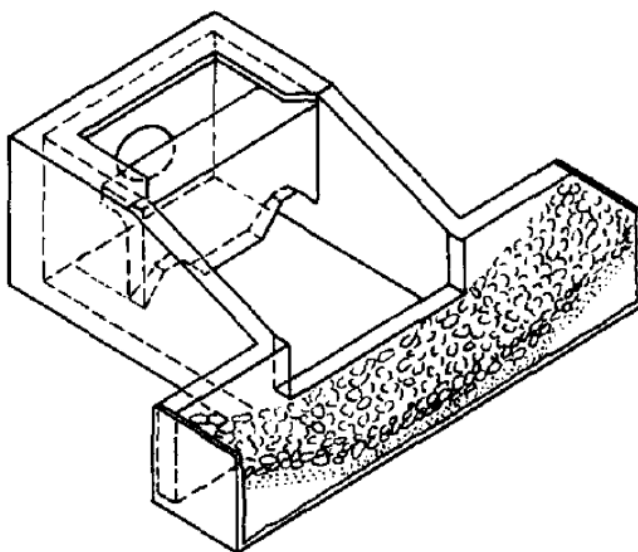


Fig. 2.1. – Esquema de uma bacia de dissipação por impacto (Fonte: Peterka (1974))



Fig. 2.2. – Bacia de dissipação por impacto (Fonte: Natural Resources Conservation Service)

2.4.2. BACIAS DE DISSIPACÃO POR MACRORUGOSIDADES

As bacias de dissipação por macrorugosidades têm aplicação em canais onde se verifique uma elevada energia de escoamento. São constituídas por rampas munidas de blocos dispostos em filas, estando os blocos de uma fila desalinhados em relação aos da fila seguinte. Embora não seja necessário um colchão de água a jusante, podem originar-se a jusante erosões com extensão e profundidade geralmente pouco significativas. A energia é dissipada pelo impacto do escoamento com os blocos. A disposição desfasada entre filas sucessivas de blocos tem como objectivo evitar que haja uma aceleração excessiva do escoamento, levando assim a um escoamento com uma velocidade aproximadamente constante entre duas filas de blocos consecutivas. Caso isto se verifique, pode, embora de forma não rigorosa, designar-se o escoamento como “uniforme”.

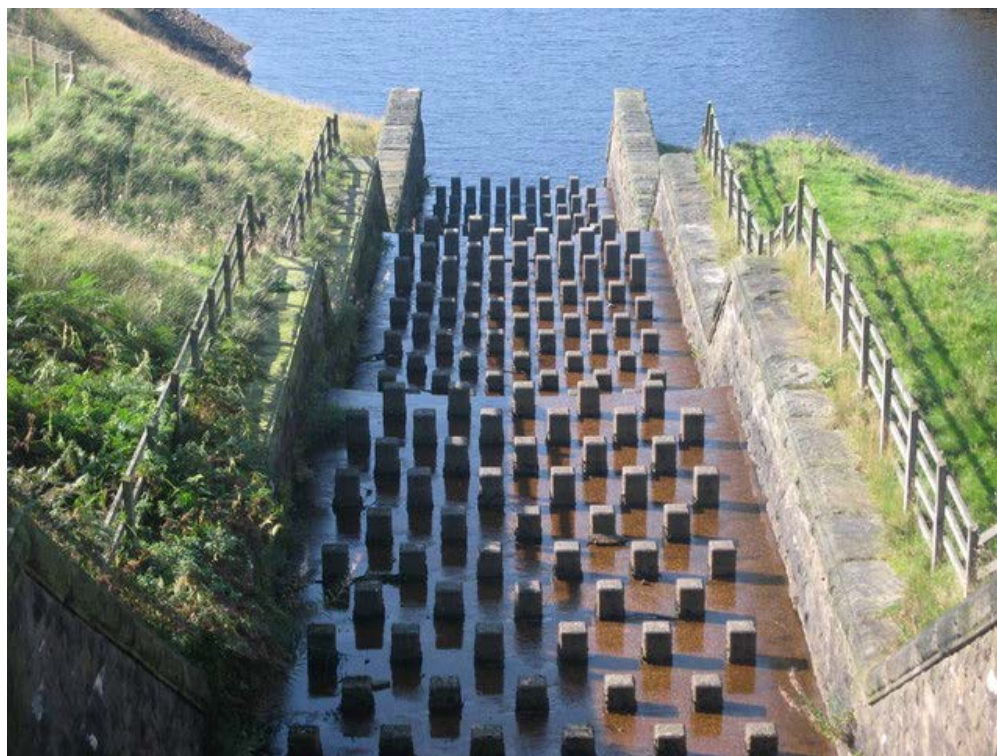


Fig. 2.2. – Bacia de dissipação por macrorugosidades

2.4.3. BACIAS DE DISSIPACÃO POR JACTO

Estas estruturas de dissipação de energia são extremamente vantajosas em termos económicos, nos casos em que as condições topográficas e geológicas do local favoreçam este tipo de construções. No caso das bacias de dissipação por jactos a energia é dissipada por impacto do jacto com o colchão de água a jusante e com o leito do curso de água, e numa medida menos significativa, pelo atrito e emulsionamento do jacto com o ar. Caso se opte por uma construção em que se cruzem jactos provenientes de dois descarregadores, a quantidade de energia dissipada antes do impacto será fortemente melhorada.

Grande parte da energia é dissipada no impacto do jacto com o colchão de água, com o próprio leito do curso de água e com as margens. A acção dinâmica do jacto provoca grandes variações de pressão no leito que podem ser transmitidas à fundação do aproveitamento hidráulico. Desta forma é de grande importância a protecção do leito e das margens a jusante da barragem nos casos em que esta se verifique ser necessária, uma vez que este tipo de dispositivos originam grandes erosões. Deve ainda ser referido que devido à magnitude das forças geradas no impacto do jacto na secção de jusante do aproveitamento, este tipo de solução é geralmente utilizado para caudais de ordem de grandeza inferior. É também usual instalar este tipo de solução em cursos de água cujo leito e margens sejam constituído por material resistente a este tipo de impacto, nomeadamente leitos rochosos.



Fig. 2.3. – Bacia de dissipação por jacto

Este método de dissipação de energia possui algumas variantes, cada uma com propriedades específicas.

No caso de descarregadores em que a descarga se faz com lâmina livre, o escoamento passa sobre a crista do descarregador, e o jacto resultante sofre um impacto imediatamente a jusante deste. Este impacto é responsável pela maior parte da dissipação de energia. A zona de impacto poderá ser revestida e protegida por um colchão de água de espessura conveniente, com recurso à construção, no curso de água, de um pequeno açude a jusante.

No caso de descarregadores em que a lâmina de água é guiada poder-se-á munir o descarregador com um trampolim em salto de esqui. Neste tipo de construção, a lâmina de água é guiada através do descarregador, sendo projectada pelo trampolim instalado no final deste. O aproveitamento pode ser munido de um ou mais descarregadores com salto de esqui, podendo, neste caso, os jactos ser guiados de forma a provocar a sua colisão durante a descarga, sofrendo assim perdas de energia substanciais ainda antes do impacto com a superfície a jusante. A energia é dissipada pelos processos já referidos de atrito e emulsionamento com o ar e por impacto com a lâmina de água e o leito do curso de água a jusante.

A análise da dissipação de energia por jacto requer a definição da zona onde vai ocorrer o impacto do jacto com a lâmina de água a jusante e também das dimensões previstas da fossa de erosão de modo a prevenir situações de instabilidade na estrutura e no leito.

2.4.3.1. Alcance e ângulos de incidência

De modo a precisar o alcance do jacto é necessário conhecer a sua trajectória. Tendo em conta as variáveis expressas na figura (2.4), a trajectória pode ser descrita pela seguinte expressão:

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

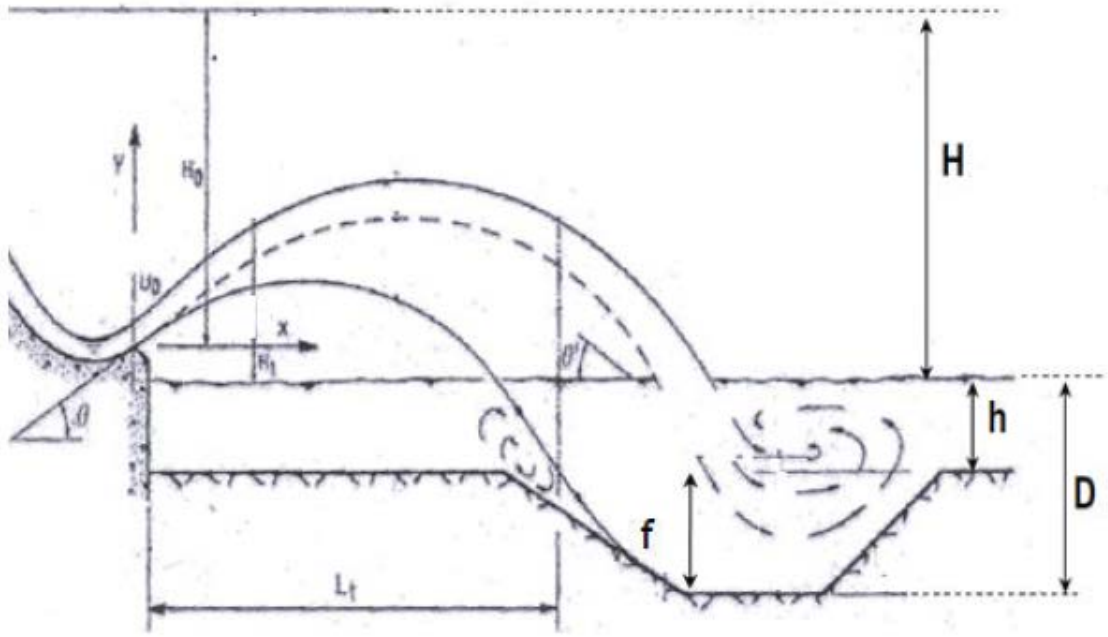


Fig. 2.4. – Alcance do jacto (Fonte: Figueiredo (2010), adaptado de Lencastre (1984))

Desta forma, o alcance teórico do jacto, L_t , pode ser definido como:

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

A partir das equações acima citadas, é possível calcular o ângulo de incidência teórico do jacto com a lâmina de água a jusante:

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{1}{\cos \theta} \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{H_1}{H_0}} \quad (2.3.)$$

2.4.3.2. Profundidade das fossas de erosão

A descarga por jactos é caracterizada pela criação de fossas de erosão de grandes dimensões, fruto do impacto violento do jacto com o escoamento a jusante. Embora o seu estudo seja frequente, tem havido uma grande disparidade no comportamento do leito a jusante, pelo que a previsão das fossas de erosão tem geralmente uma grande dependência de ensaios em modelo físico, após prospecção geológica do local de implantação do protótipo.

As fórmulas de interesse para o presente estudo assumem duas formas fundamentalmente diferentes. A primeira, na qual se inserem a grande maioria das fórmulas até hoje publicadas, tomam a seguinte forma geral:

$$D = K \cdot \frac{q^x \cdot H^y}{d_i^z} \quad (2.4.)$$

na qual D e H são variáveis representadas na figura (2.4.) e q e d_i representam, respectivamente, o caudal por unidade de largura e o diâmetro característico do material constituinte do solo na zona de impacto. Os expoentes x , y e z , bem como a constante K tomam valores diferentes para cada autor. Os seus valores podem ser consultados no seguinte quadro, adaptado de Figueiredo (2010):

Quadro 2.1. – Coeficientes para o cálculo da profundidade das fossas de erosão

Autor	K	x	y	z	d_i
Eggenberger	1,44	0,6	0,5	0,4	d_{90}
Franke	1,13	0,67	0,5	0,5	d_{90}
Hartung	1,4	0,64	0,36	0,32	d_{85}
Machado	1,35	0,5	0,3145	0,0645	d_{90}
Patrashev	3,877	0,5	0,25	0,25	d_{90} (mm)
Schoktlisch	0,521	0,57	0,2	0,32	d_{90}
Veronese	0,202	0,54	0,225	0,42	d_m

De notar que apenas foram apresentadas fórmulas para as quais o expoente z do diâmetro não é nulo dado ser intenção neste trabalho analisar o comportamento de diferentes materiais constituintes do leito na zona de restituição.

A segunda tipologia de fórmulas para a avaliação da profundidade de fossas de erosão caracteriza-se por ter em conta, para além dos parâmetros anteriormente referidos, a espessura do colchão de água a jusante. Desta forma, Martins (1973) propôs a seguinte expressão:

$$D = 0.14 \cdot N - 0.73 \cdot \frac{h^2}{N} + 1.7 \cdot h \quad (2.5)$$

Onde,

$$N = \sqrt[7]{\frac{Q^3 \cdot H^{3/2}}{d_{90}^2}} \quad (2.6)$$

2.4.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO

A formação de um ressalto hidráulico é uma das formas mais correntes de dissipação de energia. No entanto, para que este ocorra, é necessário que se verifiquem determinadas condições de escoamento. No caso em que a altura de água a jusante seja superior àquela correspondente ao regime lento resultante do ressalto hidráulico, haverá uma tendência para o afogamento deste. Face a esta situação,

uma solução possível será o recurso a um dissipador por trampolim submerso. O mecanismo de dissipação consiste na formação de dois rolos de eixo horizontal, com sentidos de rotação contrários. Este tipo de dissipador pode ou não apresentar dentes no trampolim. No caso do trampolim sem aqueles acessórios, o escoamento é projectado na sua totalidade para cima. Para alturas de água a jusante relativamente baixas, o segundo rolo apresenta uma actividade muito intensa, com uma tendência para projectar material para montante. A vantagem da utilização de dentes consiste em impedir que o material móvel do leito seja transportado para o interior do trampolim, evitando assim que o próprio dissipador se danifique.

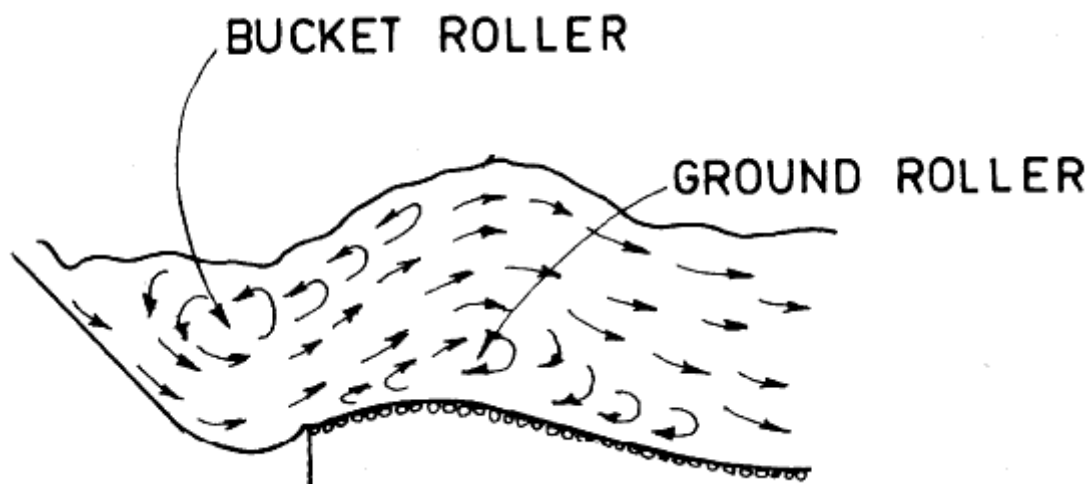


Fig. 2.5. – Funcionamento do trampolim submerso sem acessórios (Fonte: Figueiredo (2010))

2.4.5. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

A bacia de dissipação por ressalto hidráulico é um dispositivo frequentemente utilizado para transformar um escoamento em regime rápido num escoamento em regime lento, desde que as condições naturais de escoamento permitam a sua formação. Ao longo do tempo foram feitos inúmeros estudos relativamente ao funcionamento do ressalto hidráulico natural, isto é, formação do ressalto em fundo plano, horizontal, de revestimento relativamente liso, e secção rectangular constante, com escoamento uniforme.

Como já foi referido, o ressalto hidráulico caracteriza-se por uma transição dum escoamento em regime rápido, para regime lento. Esta mudança de regime conduz a uma perda considerável de energia, originada pelo fenómeno de turbulência descrito anteriormente. O fenómeno de dissipação causa grandes flutuações de pressão na soleira da zona onde ocorre a descarga de caudais. Assim, é necessária uma protecção do leito de modo a evitar erosões e escavações significativas. É ainda de notar que a turbulência gerada no ressalto pode originar fenómenos de cavitação no leito da secção de escoamento. A cavitação ocorre devido às flutuações bruscas de pressão. Assim que a pressão decresce para valores abaixo da pressão de vapor do fluido que se escoia, a água, formam-se bolhas de gás a uma pressão relativamente baixa, cuja deslocação e posterior colapso pode danificar seriamente a soleira da bacia. Os efeitos verificam-se principalmente em estruturas de betão, podendo a sua degradação deixar a armadura exposta.

As bacias de dissipação por ressalto hidráulico podem assumir diversas configurações. De acordo com o United States Bureau of Reclamation (USBR), mediante a instalação de acessórios na bacia, surgem os tipos II, III e IV, cujas características se apresentam de seguida:

- Tipo II: munidas de blocos de queda e soleira terminal com dentes;
- Tipo III: munidas de blocos de queda, blocos de impacto e soleira terminal;
- Tipo IV: munidas de blocos de queda e soleira terminal.

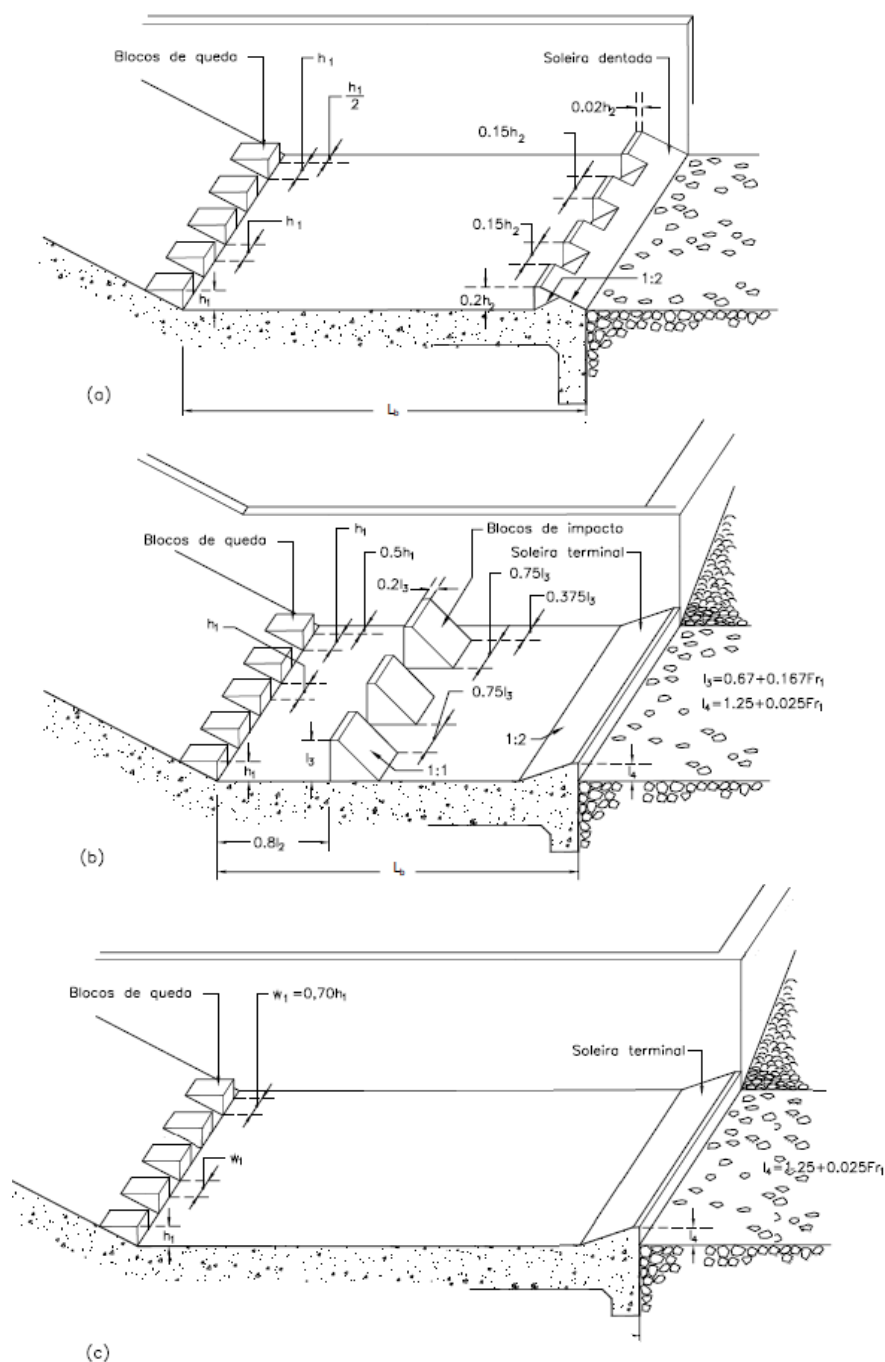


Fig. 2.6. – Bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico propostas por USBR; (a) tipo II; (b) tipo III; (c) tipo IV (Adaptado de Pinheiro (2006))

A bacia de dissipação do tipo I, corresponde a uma bacia de dissipação sem acessórios.

A escolha do tipo de bacia a adoptar requer como consequência a definição dos parâmetros do ressalto instalado, nomeadamente o número de Froude a montante do ressalto, Fr_1 , velocidade média na secção de montante do ressalto, U_1 , e caudal específico, q . De seguida apresentam-se na figura (2.7.) os valores limite dos parâmetros referidos aconselhados na utilização de cada tipo de bacia de dissipação por ressalto hidráulico:

Tipo	Fr_1 (-)	U_1 (m/s)	q (m²/s)
II	> 4.5	< 33	-
III	> 4.5	< 18	< 18
IV	$2.5 < Fr_1 < 4.5$	-	-

Fig. 2.7. – Valores limite para cada tipo de bacia de dissipação por ressalto hidráulico

Um dos passos fundamentais para a correcta escolha do tipo de bacia de dissipação a utilizar consiste na definição de alguns parâmetros do escoamento e do ressalto. Estes ajudarão também a prever a eficiencia da bacia em termos de dissipação de energia.

2.4.5.1. Número de Froude

Uma vez que o ressalto hidraulico é um fenómeno em que ocorrem escoamentos com superfície livre, as forças mais significativas que nele interagem são as forças gravíticas e de inércia. O número de Froude, Fr_1 , é um parâmetro adimensional que relaciona estas forças, de acordo com a seguinte expressão:

$$Fr_1 = \frac{U_1}{\sqrt{g \times D_1}} \quad (2.7.)$$

em que U_1 é a velocidade, D_1 a altura de escoamento na secção de montante do ressalto e g a aceleração da gravidade

Geralmente é utilizado o número de froude na secção a montante do ressalto. Uma vez que para que se forme o ressalto hidraulico é necessário um escoamento rápido, este número é sempre maior que a unidade. Caso contrário, não se verifica a formação do ressalto.

De acordo com Peterka (1974) o ressalto pode ser classificado em função do ser número de Froude. Para números de Froude compreendidos entre 1,0 e 1,7, forma-se o chamado ressalto ondulado (undular jump) caracterizado por ondulações moderadas à superfície. Quando Fr_1 se aproxima de 1,7 a altura de água à saída é de sensivelmente metade da altura à entrada do ressalto, sendo a velocidade também cerca de metade. Para números de Froude superiores a 1,7 mas inferiores a 2,5 começa a

verificar-se a formação dum rolo. Nesta fase o ressalto é designado por ressalto fraco ou pré-ressalto. Caracteriza-se por uma baixa eficiência de dissipação de energia, da ordem, no máximo, de 20%. Este tipo de ressalto requer unicamente que se verifique um comprimento adequado para a protecção do leito. Para valores compreendidos entre 2,5 e 4,5 forma-se o ressalto oscilante que apresenta já ondulações fortes, passíveis de causar erosões significativas no leito. Quando o número de Froude se situa entre 4,5 e 9,0, ocorre o ressalto estável. Este apresenta uma estrutura bem definida. Verifica-se turbulência dentro dos limites do ressalto e o escoamento a jusante deste não apresenta grandes ondulações. A perda de energia percentual está normalmente entre os 45% e os 70%. Para números de Froude superiores a 9,0, ocorre um ressalto forte. Este caracteriza-se por ser extremamente eficiente em termos de dissipação de energia, podendo esta alcançar 85% da energia na secção de entrada do ressalto. No entanto não é muito utilizado uma vez que apresenta muito forte turbulência, podendo facilmente danificar as estruturas de dissipação.

2.4.5.2. Alturas conjugadas

As alturas conjugadas, D_1 e D_2 , são dois parâmetros específicos do ressalto hidráulico. Consistem nas alturas imediatamente a montante e imediatamente a jusante do ressalto. As alturas conjugadas podem ser relacionadas, tendo em conta o número de Froude, Fr_1 , de acordo com a seguinte equação proposta por Bélanger (1828):

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (2.8.)$$

A equação (2.8.) tem como base o princípio de conservação da quantidade de movimento de Newton, e é válida mediante se verifiquem as seguintes condições:

- Canal rectangular com paredes paralelas e fundo horizontal
- Escoamento com caudal e velocidade constantes
- Fluido incompressível
- Efeitos de entrada de ar desprezáveis

A diferença entre a altura a jusante e a montante é designada por altura do ressalto.

2.4.5.3. Comprimento do “rolo”

É importante distinguir a extensão do ressalto hidráulico do comprimento do rolo. O rolo é a zona do ressalto onde ocorre a turbulência de maior intensidade. Estas perturbações são detectáveis a vista desarmada. O seu comprimento pode ser estimado visualmente, no entanto a precisão dos resultados é discutível.

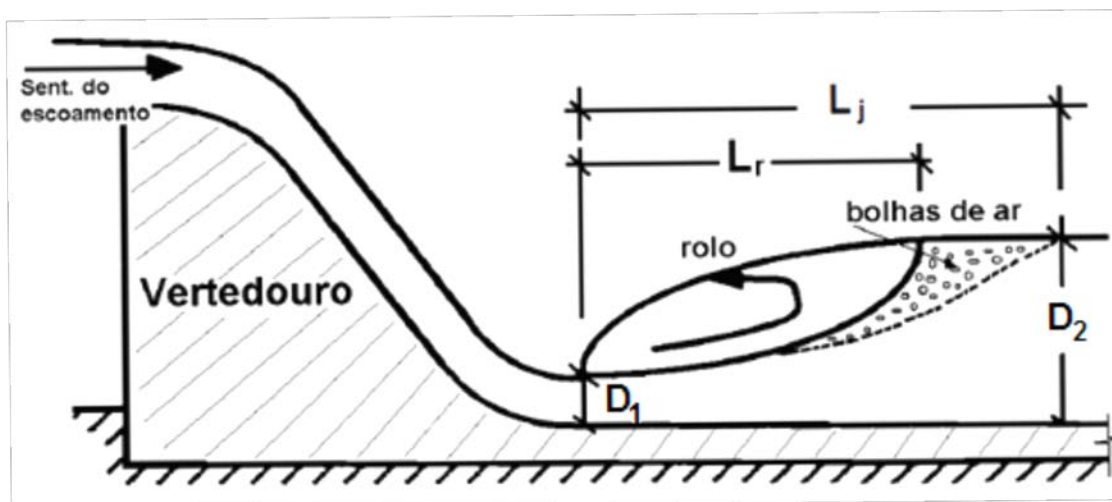


Fig.2.8. – Comprimento do ressalto e do rolo (Fonte: Teixeira (2003))

Parece haver na literatura uma falta de consenso sobre o que constitui o comprimento do rolo. Segundo Rajaratnam (1965) a secção final do rolo é o local onde a altura de água atinge 95% da altura conjugada D_2 , tendo esta definição sido confirmada posteriormente por Peterka (1974) e Lopardo (1986). Marques et al (1997) por sua vez, fixam o final do ressalto em função das pressões verificadas no fundo do canal. Desta forma, existem na literatura várias expressões propostas para estimar o comprimento do rolo, expostas na figura (2.9.).

Autor	Data	Equação
Safranez	1929	$\left(\frac{L_r}{D_1}\right) = 6 \cdot Fr_1$
Pietrkowski	1932	$\left(\frac{L_r}{D_1}\right) = 5,9 \cdot Fr_1$
Einwachter	1933	$L_r = \left(15,2 - \frac{0,24 \cdot D_2}{D_1}\right) \left\{ \left(\frac{D_2}{D_1} - 1 - U_1 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1} - 1\right)\right) \right\}$
Douma	1942	$L_r = 3 \cdot D_2$
Peterka	1957	$L_r = 4,5 \cdot D_2 \quad (4,5 \leq Fr_1 \leq 9)$
Newnham	1973	$L_r = 6,73 \cdot (Fr_1 - 1)$
Sarma e Newnham	1973	$\frac{L_j}{L_r} = 1,3$
Busch	1981	$L_r = \alpha \cdot R^{*\beta} \cdot Fr_1^\gamma \cdot \omega^\delta \cdot \ln(Y^a)$ $\alpha = 1,285; \beta = 0,0683; \gamma = 1,1017;$ $\delta = 0,1605; Y^a = D_2/D_1 \text{ (Bélanger)}$ $\omega = D_1/b; b = \text{largura do canal.}$
Marques et al	1997	$L_r = 6,0 \cdot (D_2 - D_1)$

Fig. 2.9. – Fórmulas propostas para o comprimento do rolo (Fonte: Teixeira(2003))

2.4.5.4. Comprimento do ressalto hidráulico

O comprimento do ressalto hidráulico, L_j , é um parâmetro importante de definir, pois permite avaliar a extensão em que se verificam os efeitos dele decorrentes. Desta forma pode ser definida a zona onde ocorre dissipação de energia e onde se verificam efeitos macroturbulentos de interesse para os projectos de obras hidráulicas. De acordo com Hager (1992) o final do ressalto pode ser definido como a secção onde a superfície livre é essencialmente horizontal, a turbulência de superfície é reduzida e o escoamento é completamente sem arejamento. A jusante desta secção, geralmente é dispensada a protecção de fundo, uma vez que o regime de escoamento se aproxima ao do curso de água em condições normais.

Pode estimar-se o comprimento do ressalto recorrendo a ábacos que relacionam esta grandeza com o número de Froude e com as alturas conjugadas, tal como o apresentado na figura (2.10):

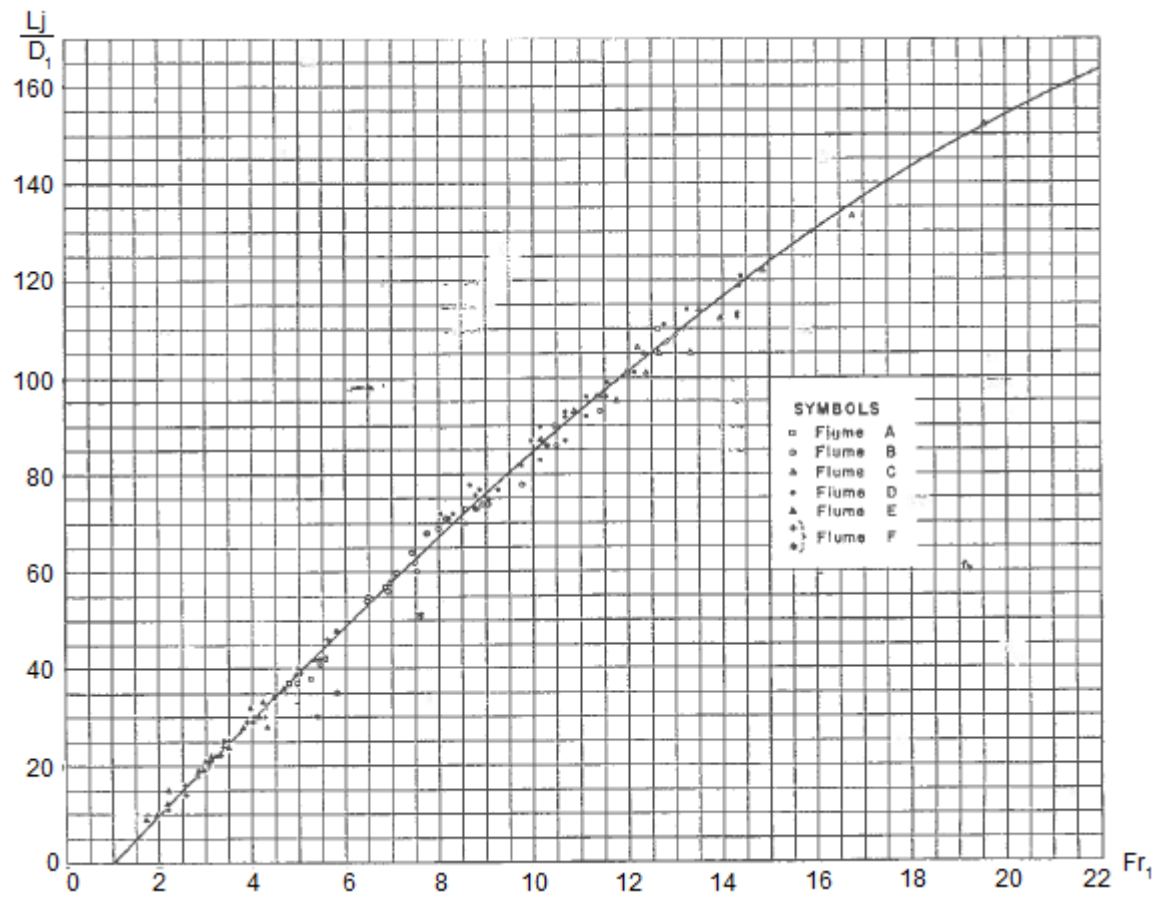


Fig. 2.10. – Relação entre o comprimento do ressalto e o número de Froude (Adaptado de Peterka (1978))

Existem ainda na literatura diversas expressões de natureza empírica que relacionam a altura do ressalto com o seu comprimento, que são apresentadas na figura (2.11.). Nesta figura L_j , D_1 , D_2 , U_1 , Fr_1 têm os significados já referidos e U_2 é a velocidade na secção de jusante do ressalto.

Autor	Data	Equação
Riegel, Beebe	1917	$L_j \cong 5 \cdot (D_2 - D_1)$
Knapp	1932	$L_j = \left[\left(\frac{62,5 \cdot D_1}{H_1} \right) + 11,3 \right] \cdot \left[\frac{(U_1 - U_2)^2}{2 \cdot g} - \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \right]$ onde $H_1 = D_1 + \frac{U_1^2}{2g}$
Woycicki	1934	$L_j = (D_2 - D_1) \cdot \left(8 - \frac{0,05 \cdot D_2}{D_1} \right)$
Smetana	1934	$L_j \cong 6 \cdot (D_2 - D_1)$
Chertoussov	1935	$L_j = 10,3 \cdot D_1 \cdot (Fr_1 - 1)^{0,81}$
Aravin	1935	$L_j = 5,4 \cdot (D_2 - D_1)$
Bakhmeteff-Matzke	1936	$L_j = 5 \cdot (D_2 - D_1)$
Ludin	1936	$L_j = \frac{D_2}{\left[0,22 - 0,17 \cdot \frac{U_2}{U_1} \right]}$
Kinney	1941	$L_j = 6,02 \cdot (D_2 - D_1)$
Posey	1941	$L_j = 4,5 - 7 \cdot (D_2 - D_1)$
Wu	1949	$L_j = 10 \times (D_2 - D_1) \times Fr_1^{-0,16}$
Peterka	1957	$L_j = 6,1 \times D_2, 4,5 \leq Fr_1 \leq 9$
Elevatorski	1959	$L_j = 6,9 \times (D_2 - D_1)$
Silverster	1964	$L_j = 9,75 \times D_1 \times (Fr_1 - 1)^{1,01}$
Marques et al	1997	$L_j = 8,5 \times (D_2 - D_1)$

Fig. 2.11. – Fórmulas sugeridas para o comprimento do ressalto hidráulico (Adaptado de Teixeira (2003))

Simões e Porto (2008) desenvolveram um estudo no qual propuseram uma fórmula para o cálculo do comprimento do ressalto a jusante de descarregadores de degraus. No entanto, este estudo foi realizado para descarregadores de declive bastante acentuado, e de secção constante. O método proposto tem, no entanto a particularidade de ter em consideração o factor de resistência, f , da soleira descarregadora.

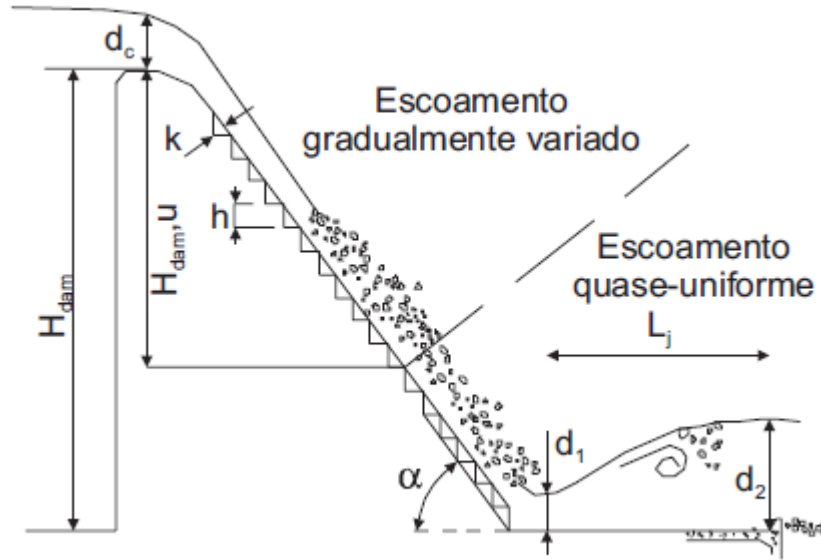


Fig. 2.12. – Comprimento do ressalto hidráulico (Fonte: Simões e Porto (2008))

O estudo realizado pelos autores permitiu estabelecer a seguinte equação, para definição de L_j :

$$L_j = \Psi_1 \frac{H_{dam}^{1+\Psi_2} \times g^{\frac{\Psi_2}{3}}}{q^{\frac{2}{3}\Psi_2}} \quad (2.9.)$$

em que q é o caudal específico escoado, a variável H_{dam} está representada na figura (2.12) e os parâmetros Ψ_1 e Ψ_2 são definidos pelas seguintes equações:

$$\Psi_1 = -53,664f^2 + 12,669f + 12,811 \quad (2.10.)$$

$$\Psi_2 = 2,3449f^2 - 1,1215f - 0,8366 \quad (2.11.)$$

Através do ajuste por mínimos quadrados, os autores propõe ainda uma segunda equação, obtida através de dados experimentais, mas baseando os valores do coeficiente de resistência, f , numa média entre 0.10, 0.163 e 0.20:

$$L_j = 6,55 \times H_{dam}^{0,05} \times q^{0,633} \quad (2.12.)$$

2.3.5.5. Dissipação de energia

Uma das propriedades mais importantes do ressalto hidráulico é a sua capacidade de dissipar eficientemente a energia do escoamento pela passagem de um escoamento rápido a um escoamento lento. Esta propriedade tem origem, como foi explicado anteriormente, na turbulência gerada no interior do rolo. Para um dado caudal escoado, a passagem da altura conjugada D_1 para D_2 origina uma passagem da energia E_1 para E_2 . Uma vez que a função da bacia de dissipação é a de reunir as condições para que ocorra uma perda significativa de energia, esta propriedade requer um estudo adequado.

A curva representada na figura (2.13.) demonstra a relação entre as energias do escoamento em regime rápido e regime lento. No ponto de coordenadas $(E_1; D_1)$ o escoamento encontra-se em regime rápido. Este regime mantém-se ao longo da curva, no sentido da direita para a esquerda, até atingir o ponto de abcissa mínima, correspondente ao escoamento crítico. Neste tipo de escoamento, a energia é mínima e a altura do escoamento corresponde à altura crítica. A partir deste ponto a curva desloca-se novamente para a direita, mas desta vez com declive positivo no sentido O-E, o que corresponde a um escoamento lento.

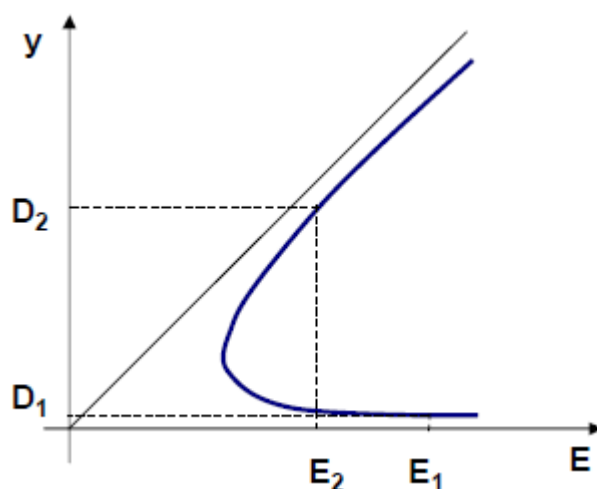


Fig. 2.13. – Energia específica em função da altura do escoamento

De modo a avaliar a perda de energia que ocorre no ressalto, a forma mais directa será calcular as energias específicas na secção de entrada e de saída do ressalto, calculando posteriormente a sua diferença.

$$\Delta H = E_1 - E_2 = \left(D_1 + \frac{U_1}{2g} \right) - \left(D_2 + \frac{U_2}{2g} \right) \quad (2.13.)$$

Outro parâmetro relevante para o estudo da dissipação de energia no ressalto hidráulico clássico é a eficiência do ressalto. Esta pode ser definida como o quociente entre a perda de energia específica, ΔH e a energia específica E_1 , na secção de montante do ressalto. O parâmetro adimensional, η , é geralmente apresentado como valor percentual.

$$\eta = \frac{\Delta H}{E_1} \quad (2.14.)$$

Peterka (1974) demonstrou que a eficiência da dissipação de energia pode ser directamente relacionada com o número de Froude. Na figura (2.14.) pode-se observar que a taxa de crescimento da eficiência vai diminuindo, atingindo propriedades quase assintóticas quando se aproxima de 85 %.

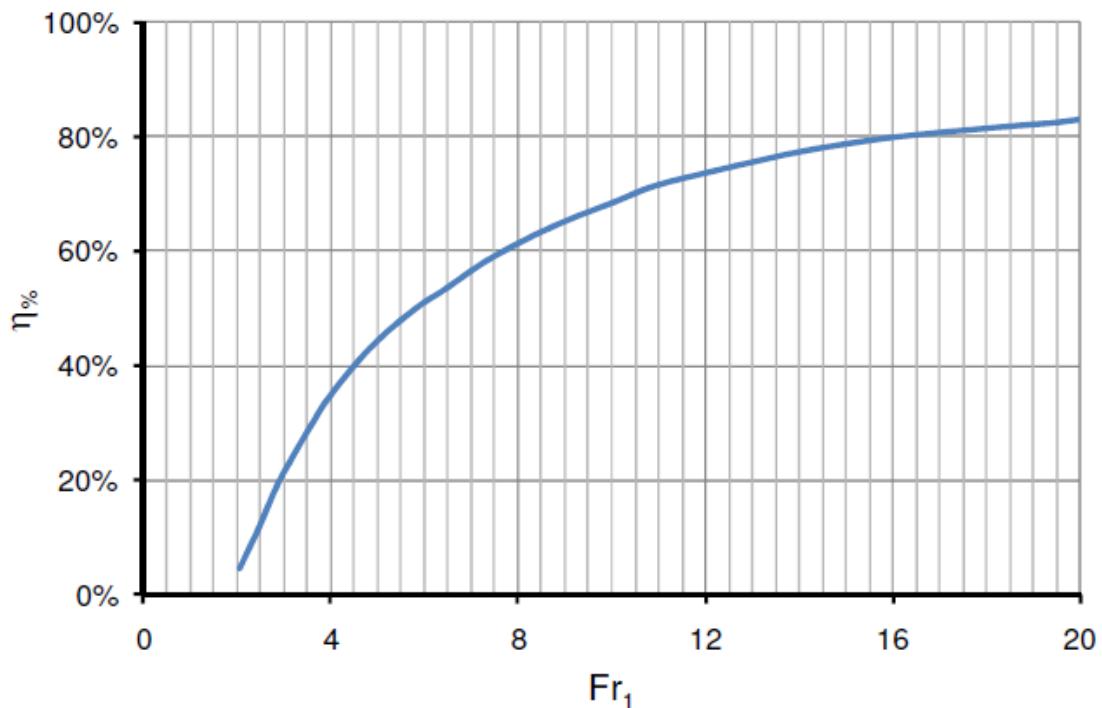


Fig. 2.14. – Relação entre a eficiência do ressalto e o número de Froude

Existem ainda, na literatura, diversas fórmulas propostas para o cálculo da perda de energia no ressalto hidráulico. Estas fórmulas têm a particularidade de relacionar a perda de energia com o número de Froude. Apresenta-se de seguida na figura (2.15.) algumas fórmulas sugeridas por vários autores.

Autor	Data	Equação
Bakhmetef e Matzke	1936	$\frac{\Delta H}{E_1} = \frac{8 \cdot Fr_1^4 + 20 \cdot Fr_1^2 - (8 \cdot Fr_1^2 + 1)^{1,5}}{8 \cdot Fr_1^2 (2 + Fr_1^2)}$
Silvester	1964	$2 - 2 \cdot \frac{D_2}{D_1} + Fr_1^2 \frac{\left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2}$ $\frac{\Delta H}{E_1} = \frac{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2}{2 + Fr_1^2}$ D_1 e D_2 obtidos pela equação de Bélanger.
Chow	1959	$\frac{\Delta H}{E_1} = \frac{\left(\frac{D_2}{D_1} - 1 \right)^3}{4 \cdot \frac{D_2}{D_1}}$

Fig. 2.15. – Fórmulas sugeridas para o cálculo da perda de energia

2.4.5.6. Profundidade das fossas de erosão

No processo de dissipação de energia por ressalto hidráulico, o leito da bacia onde este se localiza está sujeita a acções hidrodinâmicas de grande intensidade.

Para protecção do leito utilizam-se na maior parte dos casos ensoleiramentos em betão. Estes ensoleiramentos podem ser simples lajes de betão ou ser providos de elementos como blocos de queda, dentes e soleiras terminais, tal como referido para os tipos de bacias atrás mencionados e que têm o efeito de diminuir o comprimento do ressalto. Em qualquer caso são soluções dispendiosas de protecção do leito do curso de água.

Em alguns casos a natureza do ressalto poderá ser resolvida com protecção do leito através de tapetes de protecção. Será necessário analisar e prever as características das fossas de erosão que poderão formar-se, se esse leito for constituído por material não coerente, para proceder ao correcto dimensionamento da protecção de fundo.

O processo de formação de fossas de erosão é um tema muito estudado devido à sua grande aplicação prática, sendo no entanto alvo de estudo mais aprofundado no caso de dissipação por jactos. No caso do ressalto hidráulico, grande parte dos estudos sobre este fenómeno têm como objectivo verificar o desenvolvimento temporal das fossas.

Pagliara et al (2009) realizaram ensaios em modelo de descarregador em canal inclinado com revestimento por blocos, esquematicamente representado na figura (2.16), chegando à seguinte expressão:

$$\left(\frac{z_{max} + h_0}{h_1} \right) = (11,64S_0 + 0,7) \times e^{(-0,64S_0 + 0,17)F_{d90}} \quad (2.15.)$$

em que z_{max} , h_0 , h_1 e S_0 são variáveis apresentadas na mesma figura e F_{d90} é o número de Froude da partícula para cada material, sendo calculado através da expressão (2.16.)

$$F_{d90} = \sqrt{\frac{U_1}{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot d_{90}}} \quad (2.16.)$$

Em que U_1 é a velocidade média do escoamento na secção demontante do ressalto, ρ_s e ρ , respectivamente as massas específicas do material do leito e da água, g a aceleração da gravidade e d_{90} o diâmetro do material do leito correspondente a uma percentagem de passados de 90%, na respectiva curva granulométrica.

Pela análise da expressão (2.15.) pode-se observar que a profundidade máxima da fossa é calculada em função das características do material aplicado no leito, traduzidas pelo parâmetro F_{d90} , permitindo avaliar a influência do material na ocorrência de erosões.

Este estudo pretendia avaliar as fossas criadas após estabilização do ressalto. Uma vez que o estudo se refere a um modelo com características diferentes do modelo existente na SHRHA da FEUP, foram feitas as necessárias adaptações para aplicação ao presente estudo.

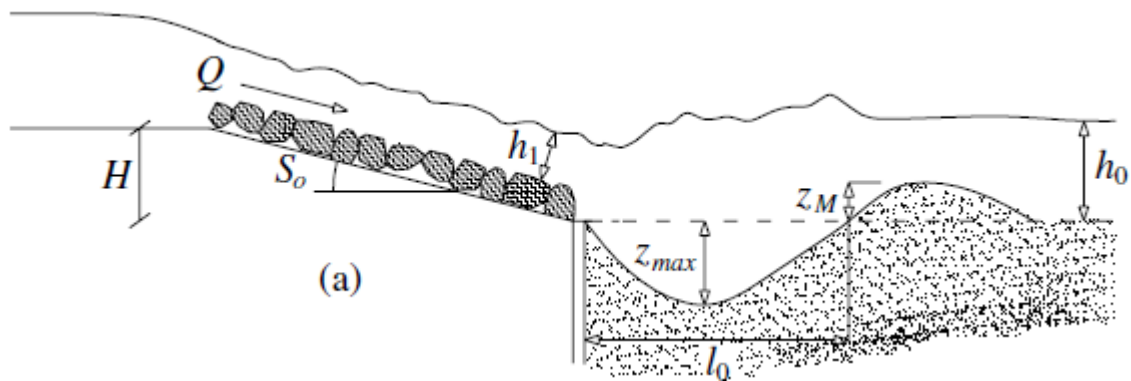


Fig. 2.16. – Esquema da instalação experimental utilizada no estudo desenvolvido por Pagliara et al (2009)

A aplicação das referidas fórmulas revela-se vantajosa na medida em que é possível obter uma noção da ordem de grandeza das fossas formadas para cada tipo de leito. Estes valores teóricos devem ser analisados e comparados com os resultados obtidos em laboratório.

2.4.5.7. Tapetes de protecção

Uma das grandes preocupações no dimensionamento de bacias de dissipação, são os efeitos que esta obra irá ter no curso de água. Devido às grandes velocidades de escoamento e, no caso específico do ressalto hidráulico, a forte turbulência e as grandes flutuações de pressão, há um risco de grande erosão do leito do rio, caso este não esteja devidamente protegido. Desta forma, de modo a mitigar as instabilidades fluviais e até da própria estrutura do aproveitamento, é necessária a instalação de um sistema de protecção do leito.

Geralmente é recomendado que se aplique um tapete de protecção em zonas onde as velocidades de escoamento sejam elevadas (superiores a 2.5 a 3 m/s em protótipo) e onde a turbulência gerada pelas descargas seja superior à existente em condições de escoamento natural. As características do tapete de protecção e a definição da zona a proteger deverão depender da forma como o escoamento se

processa. Assim sendo, é necessário realizar ensaios em modelo que permitam determinar em cada caso as características do escoamento e os seus efeitos no leito do curso de água.

O sistema designado por filtro invertido consiste na utilização de material poroso, de dimensões e granulometria que permitam a drenagem do material que suportam. Os materiais devem ser sobrepostos, em camadas de granulometria distinta. As dimensões do material constituinte devem ser crescentes de camada para camada, no sentido ascendente do filtro. O filtro deverá satisfazer ainda as seguintes condições:

- Opor-se à penetração de elementos finos e não penetrar no maciço;
- Ser suficientemente permeável;
- Ser estável sob a acção do escoamento

Em termos práticos, isto resulta em certas imposições para as características dos materiais a utilizar, tendo em atenção as curvas granulométricas do material constituinte do leito e dos materiais das diferentes camadas do filtro. Em primeiro lugar, o material a utilizar na primeira camada do filtro deverá apresentar um valor d'_{15} pelo menos quatro vezes superior ao valor d_{15} do material do leito, mas inferior a quatro vezes o diâmetro d_{85} desse mesmo leito, ou seja:

$$4 \cdot d_{15} < d'_{15} < 4 \cdot d_{85} \quad (2.17.)$$

Em que d_{15} e d_{85} se referem ao material do leito, e d'_{15} se refere ao material a utilizar como filtro. Por outro lado, deve ser garantido que o diâmetro característico d'_{60} do material a aplicar seja menor que o dobro do diâmetro d'_{10} , ou seja:

$$d'_{60} < 2 \cdot d'_{10} \quad (2.18.)$$

Onde os parâmetros d'_{60} e d'_{10} dizem respeito, novamente, ao material da primeira camada a aplicar como filtro. Para camadas sucessivas, devem ser garantidas as mesmas condições, podendo admitir-se que o material utilizado em cada última camada vai funcionar como material constituinte do leito para aplicação das expressões (2.17.) e (2.18.). Este processo deve ser repetido até que seja aplicada uma camada de material, que pelas suas dimensões, seja capaz de resistir ao arrastamento por parte do escoamento, funcionando como camada estabilizadora.

2.4.5.8. Definição da camada estabilizadora do tapete de protecção

Em bacias de dissipação podem verificar-se condições de escoamento com velocidades elevadas e níveis de turbulência muito acima dos correspondentes ao curso de água natural que poderão provocar o arrastamento do material do leito. Em virtude deste facto, é necessário garantir que o leito seja capaz de resistir para além das forças hidrodinâmicas nele actantes, às acções de arrastamento do seu material constituinte.

Há essencialmente dois tipos de critérios para análise da estabilidade do material do leito de um curso de água, que se baseiam respectivamente na análise do valor das tensões de arrastamento no fundo ou no valor das velocidades de escoamento. No presente trabalho apenas será usado este último critério, sendo então necessário garantir que as velocidades de escoamento estejam abaixo de valores

denominados como velocidade críticas, evitando assim o transporte do material do leito para jusante, que provocaria grandes erosões e, conseqüentemente, instabilidades indesejáveis.

Surge assim a necessidade de estabelecer uma velocidade limite para que tal não aconteça. Esta velocidade, designada por velocidade crítica de arrastamento, U_{cr} , que é função das características do material do leito ou da sua protecção, foi fruto de vários estudos ao longo do tempo.

Apresentam-se, nos ábacos das figuras (2.17) e (2.18) os critérios propostos respectivamente por ASCE (1967) e Hjülstrom (1935) cujos estudos permitem estabelecer os limites para a velocidade crítica, U_{cr} , num dado escoamento em função das características do material constituinte do leito do curso de água, traduzidas pelo seu diâmetro médio.

Considera-se também de interesse referir o método proposto por Neill. Este autor define a velocidade crítica como a mínima velocidade capaz de mover o material, e a partir da qual este passa a ser transportado. Recorrendo a estudos previamente realizados por diversos autores, e através de ensaios em laboratório, Neill chegou à seguinte expressão para calcular U_{cr} :

$$\frac{U_{cr}^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right) \cdot d_{50} \cdot g} = 2,5 \left(\frac{h}{d_{50}}\right)^{0.2} \quad (2.19.)$$

Em que γ_s e γ representam, respectivamente, o peso específico do material em análise e o peso específico da água, g representa a aceleração gravítica, d_{50} representa o diâmetro médio do material em análise e h representa a altura do escoamento.

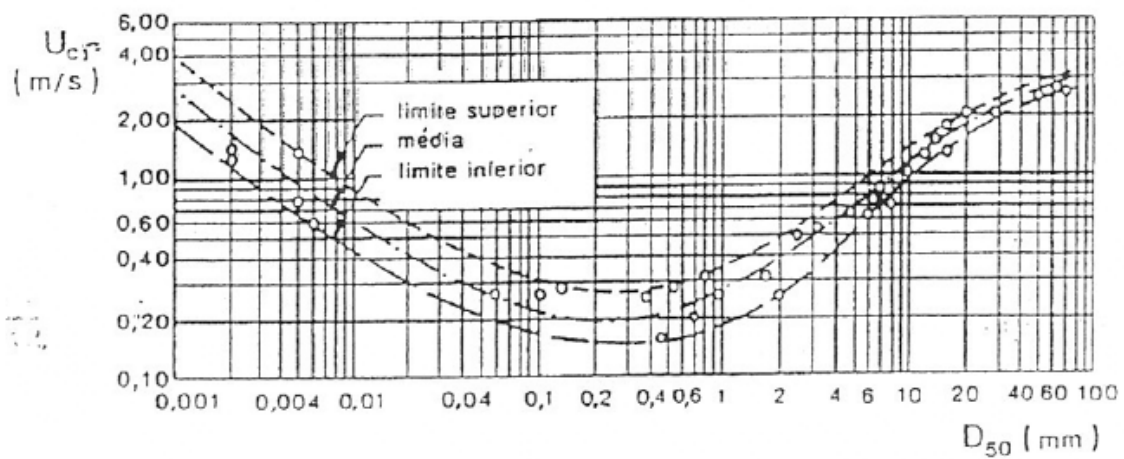


Fig. 2.17. – Velocidade média crítica em função do diâmetro médio (Fonte: Maia (2011) adaptado de Chang (1988))

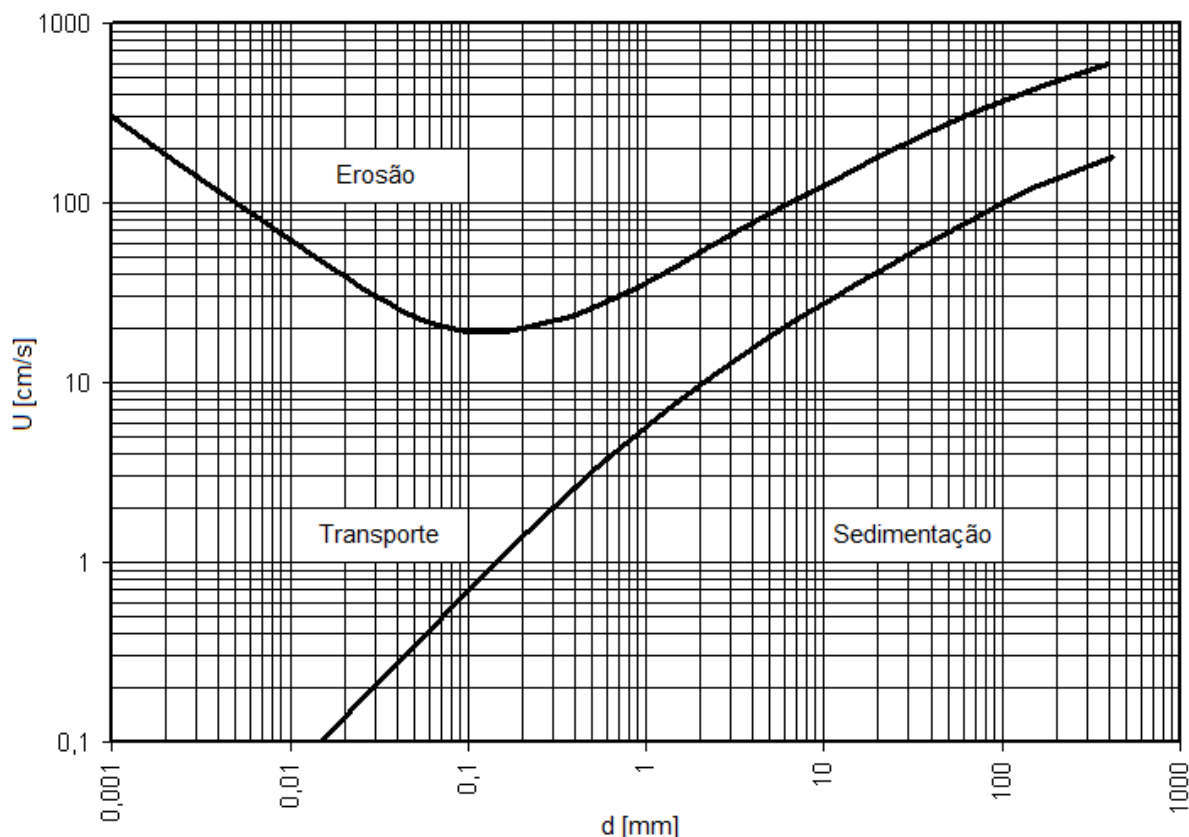


Fig. 2.18. – Ábaco de Hjulström

2.5. ESTUDO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA A JUSANTE DO DESCARREGADOR DE DEGRAUS EM ESTUDO

O objectivo deste estudo é o estudo em modelo reduzido da dissipação de energia a jusante de um descarregador de degraus, utilizando o fenómeno do ressalto hidráulico para esse efeito.

Foram feitos ensaios em fundo fixo que permitiram a caracterização do ressalto e ensaios em fundos móveis de diferentes características que permitiram a análise do seu comportamento face aos ressaltos hidráulicos ocorridos.

Embora o presente estudo pretenda focar-se na dissipação de energia por ressalto hidráulico, ao longo dos ensaios realizados no laboratório, a observação do escoamento na secção de jusante do descarregador levou à sua análise e à consideração da existência de um jacto à saída do último degrau do descarregador, sendo então analisada a localização do início do ressalto hidráulico em cada situação de escoamento e considerada a hipótese do efeito desse tipo de descarga nas fossas de erosão originadas.

Foi analisado o efeito do ressalto hidráulico nos diferentes materiais constituintes dos fundos móveis e, tendo em atenção as características dos ressaltos hidráulicos originados, a possibilidade de utilização de um tapete de protecção para protecção do leito a jusante.

Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos através das expressões ou ábacos agora apresentados.

3

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

3.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Na realização do presente estudo foi usado um modelo físico de um descarregador em degraus, munido de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a jusante, existente no Laboratório de Hidráulica, da Secção de Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. É apresentado na figura (3.1.).



Fig. 3.1. – Modelo de descarregador de cheias e bacia de dissipação de energia

A instalação funciona em circuito fechado, está esquematicamente representada na figura (3.2.), é constituída por dois reservatórios de alimentação, a partir dos quais a água é bombada por um conjunto de tubagens para um reservatório de tranquilização, imediatamente a montante do descarregador. Após a passagem por este, a água passa pela bacia de dissipação, sendo conduzida para um terceiro reservatório, de recolha de caudais, situado a jusante, de onde é bombada para o reservatório de alimentação.

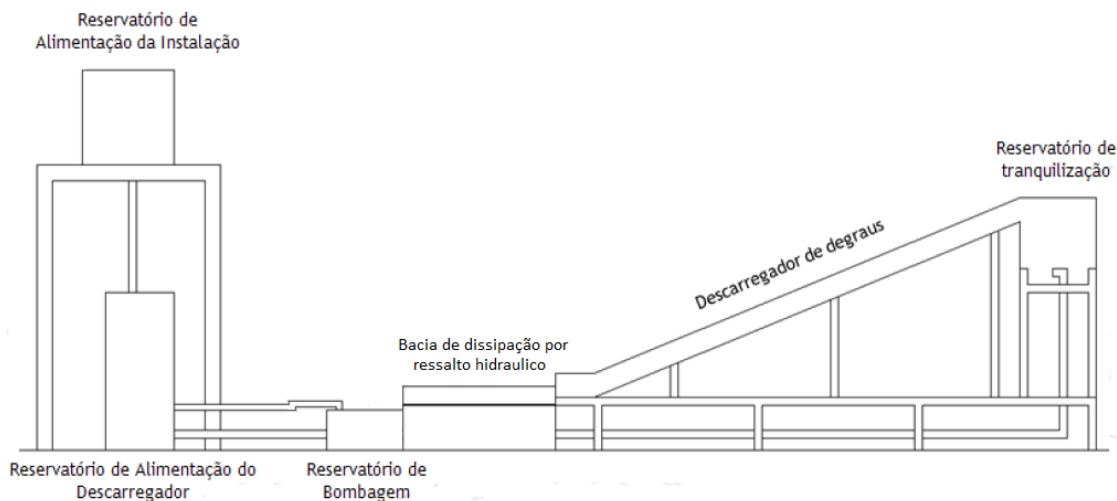


Fig. 3.2. – Esquema da instalação experimental (adaptado de Figueiredo (2010))

O descarregador foi realizado em betão, respeitando a semelhança de Froude e a escala geométrica de 1/40. Apresenta 26 degraus, cada um com uma altura de cerca de 3,75 cm e comprimento de 10cm, secção convergente na metade de montante do seu comprimento, onde a largura dos degraus varia de 15 cm no primeiro degrau até 5 cm no décimo terceiro, largura que se mantém constante nos degraus seguintes. O comprimento total é de 2,6 m e a altura é igual a 1,0 m.



Fig. 3.3. – Pormenor de degraus no descarregador, na secção de largura constante

A restituição de caudais a jusante do descarregador é feita num reservatório de perspex que, na sua secção de jusante dispõe de uma comporta plana que permite regular o caudal de saída e, consequentemente, o nível de água na restituição. Nesse reservatório foi criada a bacia de dissipação por ressalto hidráulico, do descarregador de degraus, através da construção de um canal, com 5cm de largura e comprimento de 100cm, situado no prolongamento do referido descarregador. O fundo do canal é amovível permitindo ensaios com fundos fixo e móveis.



Fig. 3.4. – Bacia de dissipação

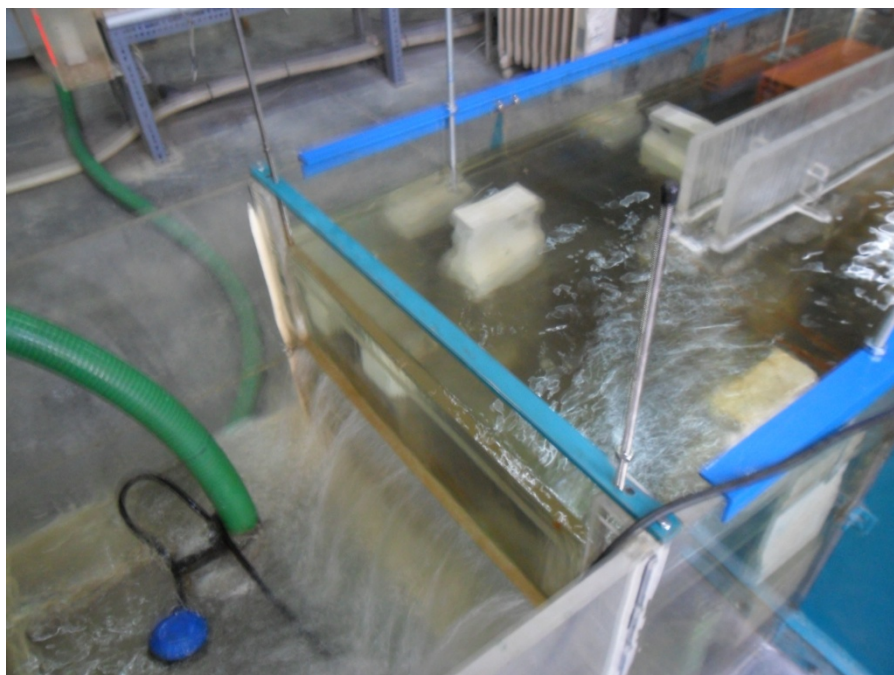


Fig. 3.5. – Comporta vertical de altura variável

Foram realizados ensaios com fundo fixo, traduzido por perpex e com fundos móveis , tendo neste caso sido utilizados diversos materiais de granulometria e dimensões variadas, de modo a poder avaliar os seus comportamentos drante as descargas de diferentes valores de caudais. Os materias utilizados foram do tipo granular sendo as respectivas curvas granulométricas apresentadas nas figuras (3.6.) a (3.8.) e as principais características apresentadas no quadro (3.1.). Os materiais utilizados foram em primeiro lugar uma areia, em segundo lugar uma brita 5/15 e em terceiro lugar uma brita 9,5/19.

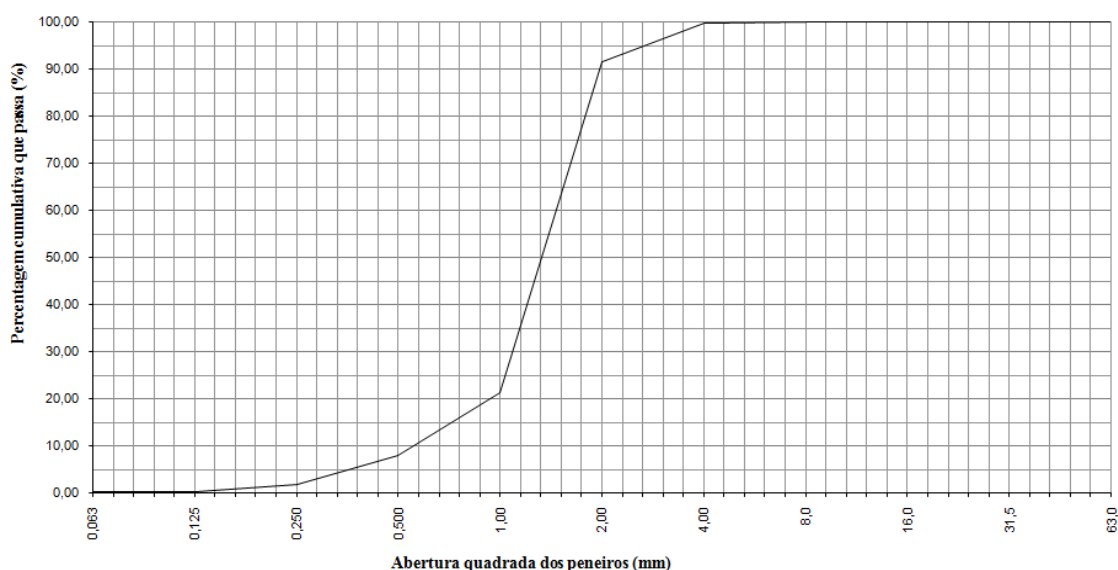


Fig. 3.6. – Curva granulométrica da areia

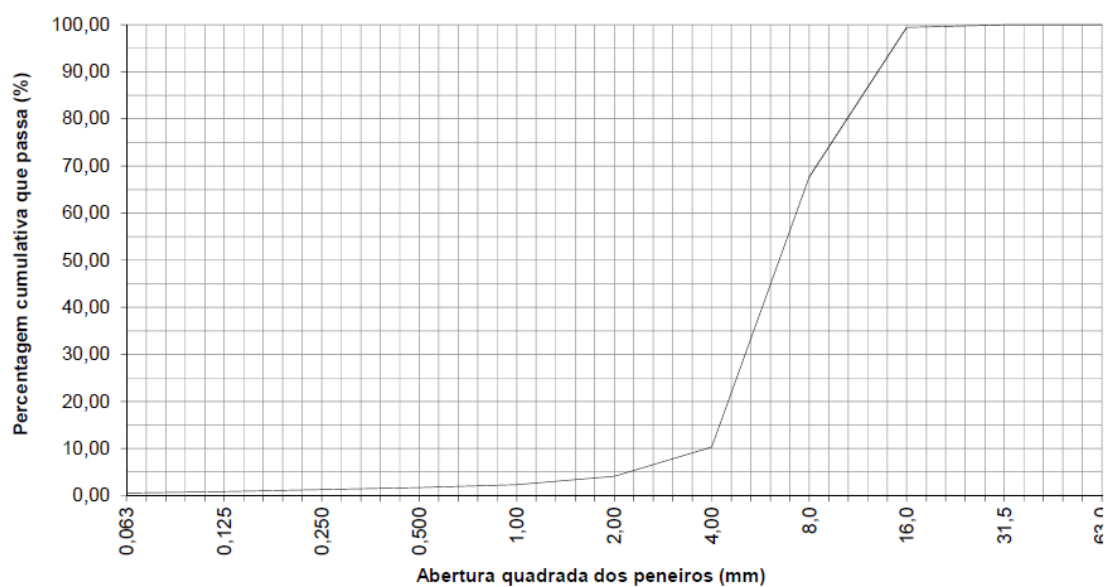


Fig. 3.7. – Curva granulométrica da brita 5/15

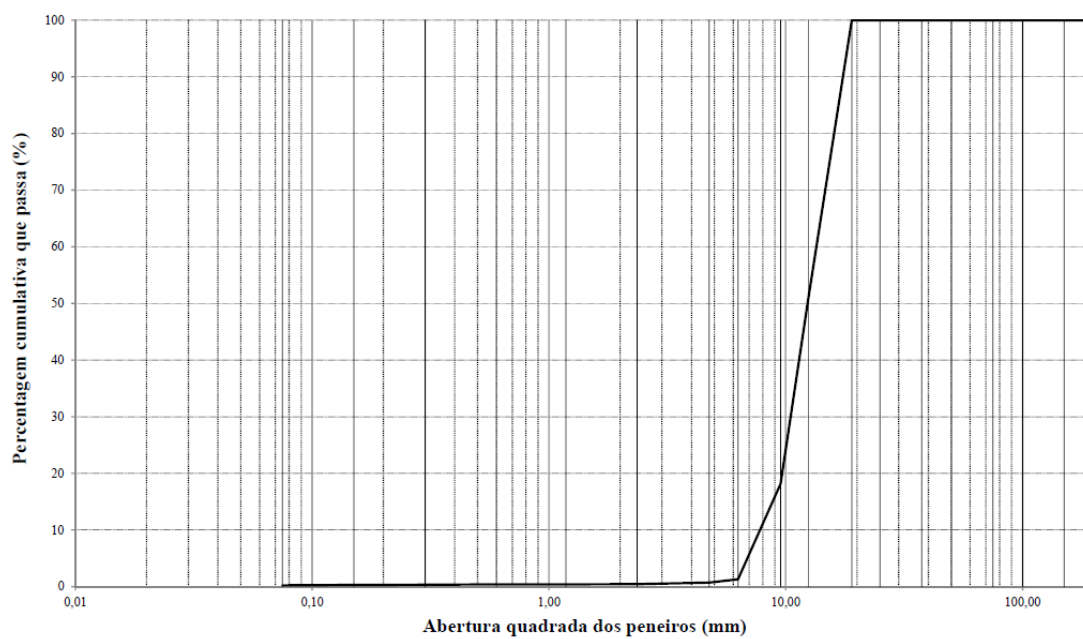


Fig. 3.8. – Curva granulométrica da brita 9,5/19

Quadro 3.1. – Características dos materiais granulares

Propriedade	Areia	Brita 5/15	Brita 9,5/19
Peso específico [kN/m ³]	26.25	26.50	26.10
d ₉₀ [mm]	2.00	16.00	19.00
d _m [mm]	2.00	8.00	12.50

3.2. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Para o presente estudo é necessário determinar, de entre outros parâmetros, os valores dos caudais escoados em cada situação de escoamento e as alturas de água tanto à saída do ultimo degrau como as correspondentes aos ressaltos hidráulicos originados. A realização de estudos em fundo móvel para as mesmas situações de escoamento originou fossas de erosão cuja caracterização foi feita através da definição do seu perfil longitudinal. Deste modo foram utilizados alguns equipamentos de modo a determinar as variáveis referidas.

3.2.1. MEDIÇÃO DE CAUDAIS

Os caudais foram medidos com recurso a um medidor electromagnético posicionado na tubagem entre o reservatório de abastecimento e o reservatório de tranquilização. Este dispositivo, da marca Fisher & Porter, modelo MAG-XE, permitia, avaliar por leitura directa os valores instantâneos dos caudais correspondentes às diferentes situações de ensaio. No entanto a avaliação dos caudais foi feita através de um sistema de aquisição de dados ao qual o equipamento foi ligado.



Fig. 3.9. – Visor do equipamento de medição de caudais

3.2.2. MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA NO ESCOAMENTO

De modo a avaliar correctamente o processamento de um ressalto hidráulico é necessário conhecer a velocidade de escoamento da água bem como as alturas conjugadas do ressalto. Para o efeito foi utilizado um conjunto flutuador-potenciómetro. O mecanismo é constituído por um cilindro flutuante de poliestireno acoplado a um potenciómetro por meio de uma vareta de aço que se apresenta na figura (3.10.). De acordo com a altura de água, o corpo flutuante vai variar a sua posição, induzindo uma rotação no potenciómetro. Este envia um sinal eléctrico de acordo com a sua posição angular, que é lido por um sistema de aquisição de dados, para posterior conversão, num valor para a altura de água. O sinal registado deve variar linearmente de acordo com a variação angular no potenciómetro. A vareta de aço tem um comprimento de 24,0 cm e o flutuador tem 2,0 cm de diâmetro.

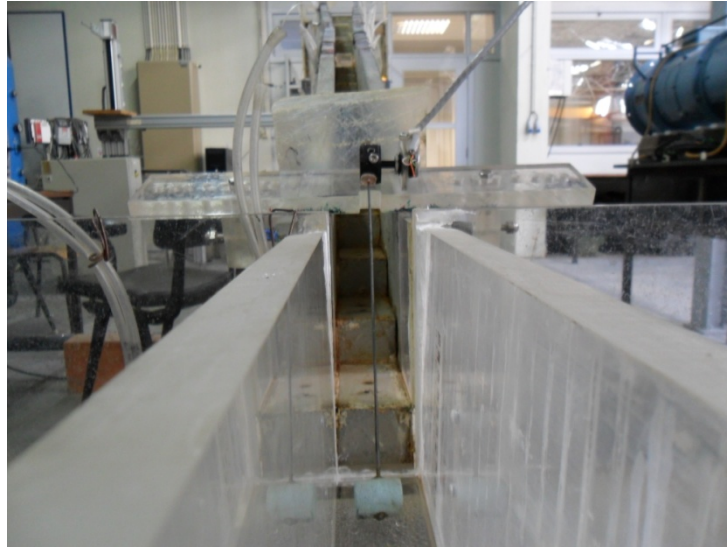


Fig. 3.10. – Conjunto flutuador/potenciômetro

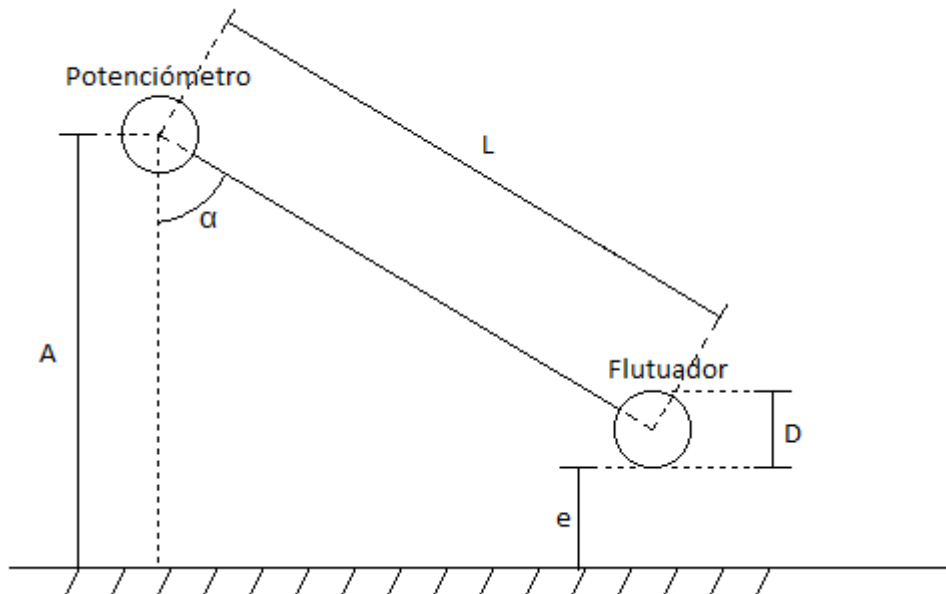


Fig. 3.11. – Esquema do conjunto flutuador/potenciômetro

Considerando A a distância entre o fundo do canal e o centro de rotação do potenciômetro, L o comprimento da vareta, medido do centro do flutuador ao centro de rotação do potenciômetro, D o diâmetro do flutuador, e a distância do plano de referência à base do flutuador, e α o ângulo formado entre a vareta e a vertical, variáveis indicadas no esquema da figura (3.11.), é possível obter a equação (3.1.) de onde é possível deduzir, uma vez conhecido o ângulo α , a altura da lâmina de água sob o flutuador.

$$\cos \alpha = \frac{A - (e + \frac{1}{2}D)}{L} \quad (3.1.)$$

3.2.3. PROFUNDIDADE DAS FOSSAS DE EROSÃO

Nos ensaios realizados com fundo móvel o objectivo foi o de avaliar as fossas de erosão criadas pelos ressaltos com diferentes caudais para posterior análise. De modo a poder medir as profundidades em vários pontos e desta forma criar um perfil longitudinal das fossas foi utilizado um método relativamente simples.

O processo consistiu em utilizar uma régua de perspex com furos espaçados de 2 cm, onde foram introduzidas 27 varetas de posição regulável. A régua foi fixada em cada ensaio no início do canal, a uma altura predefinida com recurso a uma duas chapas e dois parafusos, como ilustrado na figura (3.12.), conhecendo-se assim a posição longitudinal de cada vareta.

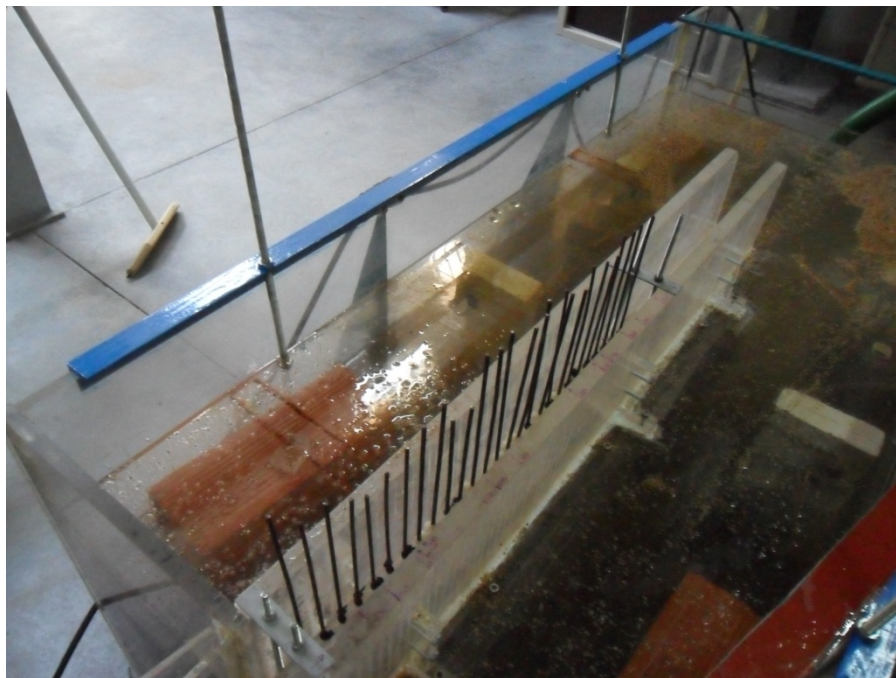


Fig. 3.12. – Régua para levantamento dos perfis das fossas de erosão fixada em posição

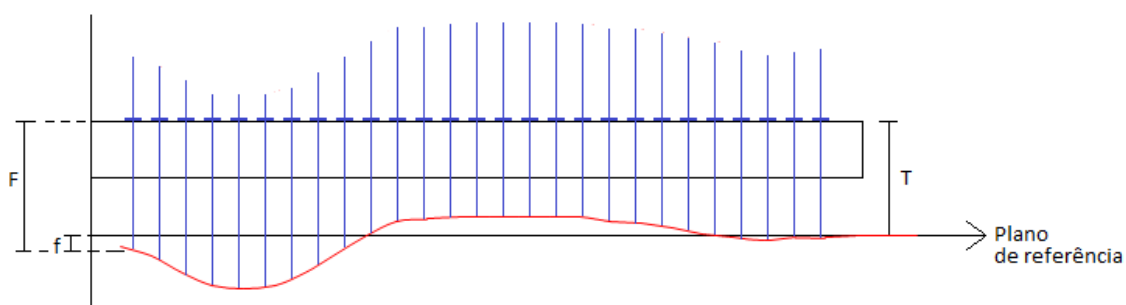


Fig. 3.13. – Esquema traduzindo as variáveis envolvidas no cálculo das profundidades de erosão

Aplicada a construção à fossa formada, facilmente se pode determinar as profundidades relativas. O valor de F traduz a distância do topo da régua até ao fundo da fossa, T representa a distância entre o

topo da régua e o plano de referência, sendo ambas medidas com recurso a uma fita métrica. A profundidade da fossa, f , é obtida através de:

$$f = F - T \quad (3.2.)$$

3.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os equipamentos de medição de caudais e alturas de água foram ligados a um sistema de aquisição de dados. Este sistema consiste numa placa National Instruments NI USB-6009. Os dados são de seguida transmitidos a um computador, que regista os valores medidos através do programa LabView 8.6. Este programa permite definir as frequências de registo dos dados, o tamanho das amostras, bem como a sua exportação para um formato legível em Excel, para posterior tratamento.



Fig. 3.14. – Placa de aquisição de dados (Fonte: Figueiredo (2010))

3.4. CALIBRAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

De modo a assegurar o correcto funcionamento de todos os equipamentos foi feita a calibração do medidor de caudais e do sistema de medição de alturas.

3.4.1. MEDIDOR DE CAUDAIS

O medidor de caudais foi calibrado com recurso a um reservatório munido de uma régua graduada, permitindo assim a leitura directa do volume de água no seu interior. O processo consistiu em:

- Escoar água para o interior do reservatório, tentando aproximar o caudal a um valor predefinido, lido no mostrador do medidor;

- Activar o sistema de aquisição de dados, registando assim continuamente o sinal correspondente ao caudal escolhido;
- Deixar que o nível da água atinja um determinado valor, neste caso 20 l;
- Registrar novamente os tempos necessários para que o volume sofra um acréscimo de 10 l, até que atinja o nível máximo do reservatório;
- Obter a média dos tempos medidos, e com este valor calcular o caudal aduzido ao reservatório;
- Repetir este processo para outros caudais dentro da gama dos que se pretendem estudar;
- Construir uma curva de calibração, relacionando os caudais obtidos com o sinal registado pelo sistema de aquisição.

A curva obtida foi comparada com calibrações realizadas em estudos anteriores, tendo-se verificado resultados satisfatórios e apresenta-se de seguida.

Quadro 3.2. – Dados relativos à calibração do medidor de caudais

Sinal [V]	Q [l/s]
1.464	0.518
1.685	0.714
2.001	0.993
2.739	1.647

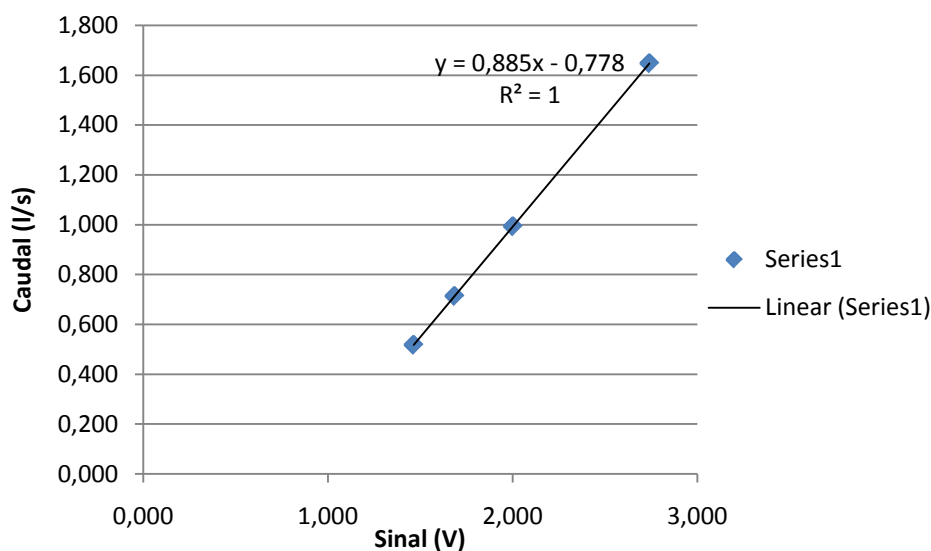


Fig. 3.15. – Curva de calibração do equipamento de medição de caudais

3.4.2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ALTURAS DE ÁGUA

A calibração deste sistema foi fundamental para permitir uma determinação rigorosa das alturas de água no ressalto. O processo foi realizado a seco e com fundo fixo, com o conjunto flutuador/potenciómetro posicionado sobre as paredes do canal simulador da bacia de dissipação a jusante do descarregador. Foi usada como superfície de referência a base do canal. Foi ainda feita uma calibração suplementar para medir a altura de água à saída do último degrau, utilizando a base deste como referência.

Uma vez que o flutuador roda em torno de um ponto fixo situado a uma altura, designada anteriormente por A , do plano de referência, o aumento da espessura da lâmina de água provoca também uma translação horizontal do flutuador, pelo que a altura é medida em pontos diferentes para caudais apreciavelmente diferentes. No caso do canal, este facto não causa qualquer problema, uma vez que a altura de fixação do aparelho e a superfície de referência se mantêm constantes. No entanto, para a medida da altura de água à saída do último degrau foram efectuadas duas calibrações para duas gamas de caudais.

O processo de calibração foi realizado pelos seguintes passos:

- Fixação do conjunto de modo a que o flutuador esteja posicionado na secção na qual se pretende efectuar a medição.
- Medição do parâmetro A , com recurso a um nível e uma fita métrica
- Posicionamento de placas de perspex de espessura conhecida sob o flutuador
- Leitura do sinal registado pelo sistema de aquisição de dados, para cada placa de perspex
- Traçado da curva de calibração

Os valores registados pelo potenciómetro verificam uma variação linear para cada incremento na variação da posição angular da vareta. No entanto, como referido anteriormente, será necessário converter estes ângulos em alturas, através da expressão (introduzir ref.). Foram registados 1000 valores, em intervalos de 25ms, sendo utilizado para os cálculos a média destes valores. Substituindo na expressão (3.2.) obtém-se assim a altura de água sob o flutuador:

$$e = A - L \times \cos \alpha - \frac{D}{2} \quad (3.3.)$$

É de referir que estes valores se referem à distância entre o ponto mais baixo do flutuador e a superfície de referência. No entanto, o flutuador encontra-se parcialmente submerso durante o escoamento, pelo que este valor não traduz correctamente a altura de água efectivamente verificada. Testes realizados por Figueiredo (2010) e Antunes (2011) demonstraram que o grau de submergência do flutuador pode ser tomado como 6,5 mm, pelo que se adicionou este valor à expressão (3.3.) para obter uma avaliação correcta das alturas de água.

4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório, na instalação descrita no capítulo 3. Para uma melhor compreensão dos resultados, apresenta-se simultaneamente uma análise crítica e discussão dos mesmos.

Os ensaios foram realizados em duas fases. Em primeiro lugar foram realizados ensaios em fundo fixo, e posteriormente em fundo móvel.

Os ensaios em fundo fixo permitiram a caracterização dos ressaltos hidráulicos ocorridos a jusante do descarregador de degraus, para as várias situações de escoamento, através dos seus parâmetros característicos, que foram mencionados no capítulo dois. Os resultados foram comparados com os obtidos pelos vários investigadores referidos na revisão bibliográfica feita.

Os ensaios em fundo móvel permitiram observar o efeito da ocorrência do ressalto hidráulico nesse mesmo fundo. Foram considerados materiais diferentes para a constituição dos fundos e analisadas as fossas de erosão originadas pelas diferentes condições de escoamento. A análise dos resultados foi feita considerando duas situações. Numa primeira análise, tendo em atenção a forma como o escoamento se processa no descarregador de degraus, para os diferentes caudais descarregados, foi considerada a possibilidade de a partir do último degrau se originar um jacto que atingindo a bacia de dissipação, causaria uma fossa de erosão. Neste caso os resultados foram comparados com os obtidos através de expressões sugeridas por vários autores para esses mesmo efeito. Numa segunda análise considerou-se o fenómeno de ressalto hidráulico ocorrido nas diferentes situações, tendo os resultados sido comparados os indicados por investigadores que trataram este mesmo assunto.

4.2. CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO

A gama de caudais utilizada foi escolhida de forma a incluir valores utilizados por Figueiredo (2010), de modo a poder comparar, de forma objectiva, o comportamento da bacia de dissipação por ressalto hidráulico com a bacia de dissipação utilizando o salto de esqui. Apresentam-se de seguida os valores utilizados para caudais, caudais específicos e velocidades médias na secção de saída do descarregador, tanto no modelo como em protótipo, segundo o modelo de semelhança de Froude.

Quadro 4.1. – Condições de escoamento em modelo

Q[l/s]	q[m²/s]	U_o[m/s]
0.51	0.010	1.091
0.71	0.014	1.084
0.85	0.017	1.231
0.99	0.020	1.369
1.17	0.024	1.551
1.35	0.027	1.624
1.47	0.029	1.497
1.65	0.033	1.695
1.89	0.038	1.738
2.00	0.040	1.815

Quadro 4.2. – Condições de escoamento em protótipo

Q[l/s]	Q[m³/s]	q[m²/s]	U_o[m/s]
5238.26	5.24	2.62	6.90
7220.69	7.22	3.61	6.86
8671.56	8.67	4.34	7.79
10051.30	10.05	5.03	8.66
11905.17	11.91	5.95	9.81
13589.32	13.59	6.79	10.27
14902.76	14.90	7.45	9.47
16668.58	16.67	8.33	10.72
19135.25	19.14	9.57	10.99
20119.86	20.12	10.06	11.48

Para esta análise foi admitido que o escoamento à saída do último degrau do descarregador se comportaria como um jacto. Desta forma adaptou-se a metodologia de estudo proposta por Figueiredo (2010) ao presente caso de estudo. Em primeira análise, foi necessário definir o ângulo de saída do jacto que depende da forma como o escoamento se processa no descarregador em função do valor de caudal descarregado. De acordo com Antunes (2010) no caso concreto do descarregador instalado na SHRHA da FEUP, o escoamento no descarregador processa-se de três formas distintas: escoamento por quedas sucessivas, escoamento de transição, e escoamento deslizante sobre turbilhões, tal como apresentado na figura (4.1.). De forma muito simplificada, pode-se admitir que para o primeiro caso o ângulo de saída é de 0 graus, enquanto que no terceiro caso, o ângulo tomado pode ser o da inclinação

do próprio descarregador. Para os caudais em regime de transição foram considerados os dois ângulos de saída.

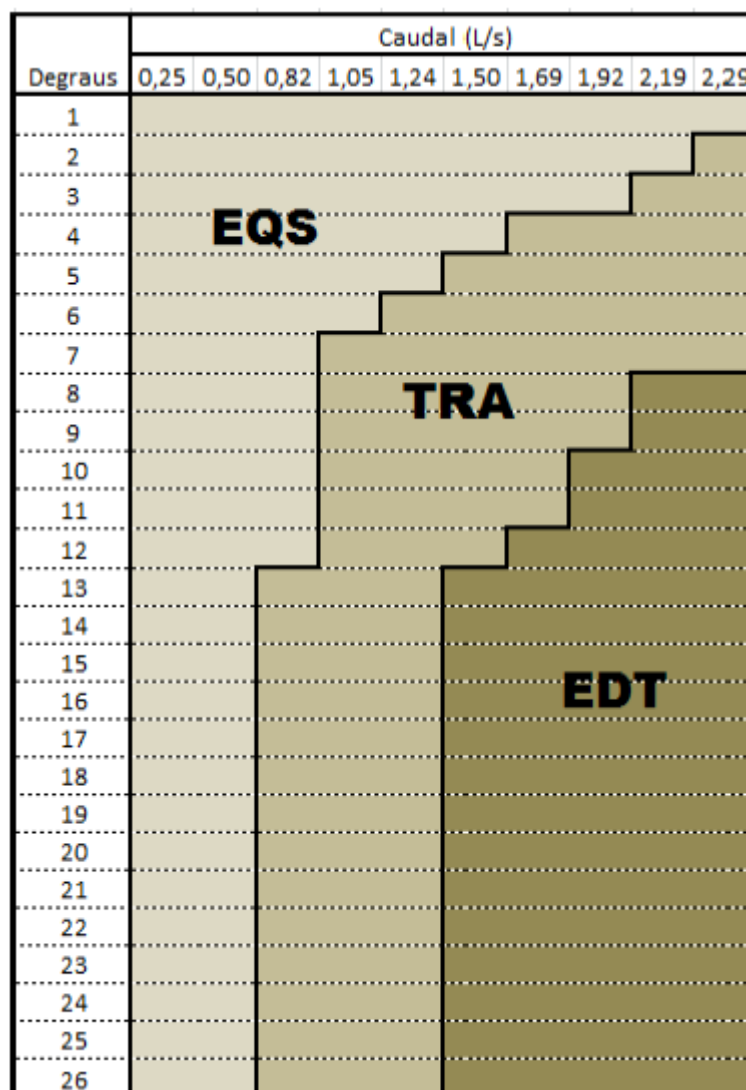


Fig. 4.1. – Esquema representativo dos regimes de escoamento observados ao longo do canal descarregador - adaptado de Antunes (2010)

Como pode ser observado na figura (4.1.) no último degrau do descarregador, pode considerar-se que o escoamento se processa por quedas sucessivas até 0,5 l/s, e que é deslizante sobre turbilhões a partir de 1,24 l/s, sendo de transição nas restantes condições de escoamento.

4.3. ENSAIOS EM FUNDO FIXO

Os ensaios com fundo fixo tiveram como objectivo a análise do escoamento na secção da restituição, isto é, a caracterização do ressalto hidráulico originado em cada condição de escoamento.

Para as diferentes condições de escoamento, acima referidas, foram criadas condições, através do controlo do nível da água na restituição, para que a formação do ressalto, em cada uma dessas situações, ocorresse o mais próximo possível do início do canal e sem ocorrência de afogamento. Mais precisamente, tendo também em conta a forma como o escoamento se processa à saída do descarregador, assemelhando-se a um jacto, o referido nível de água foi estabelecido, para cada caudal escoado, de tal forma que o ressalto hidráulico ficasse localizado imediatamente a jusante do ponto de impacto do jacto na bacia de dissipação, de modo a evitar afogamento do escoamento nessa secção.

A caracterização do ressalto hidráulico, em cada situação de escoamento, foi feita através da definição das suas alturas conjugadas, $D1$ e $D2$, do comprimento do ressalto, Lj , do comprimento da zona de escoamento onde existe a maior perturbação, também denominada como comprimento do rolo, Lr , e da perda de energia, ΔH , verificada em cada situação.

Foi igualmente analisada a localização do início do ressalto, no canal a jusante, tendo em atenção as características particulares do escoamento à saída do descarregador de degraus.

4.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO – ALTURAS CONJUGADAS

Para cada um dos caudais referidos o quadro (4.1.) foram medidas as alturas de água na secção de saída do último degrau, h_s e as alturas conjugadas, $D1$ e $D2$, utilizando o processo de medição com o sistema de flutuador, descrito no capítulo 3. No quadro (4.3.), são apresentados os referidos valores. São igualmente apresentados no mesmo quadro valores calculados a partir dos anteriores, tais como valores de velocidades médias na secção de saída do descarregador, U_0 , na secção de entrada do ressalto hidráulico, $U1$, bem como valores do número de Froude nessa secção, Fr_1 , obtido utilizando a expressão (2.7.).

Os resultados relativos à altura conjugada $D2$, designados por $D2_{medido}$, foram comparadas com as obtidas pela expressão de Bélanger (2.8.), $D2_{teórico}$ os quais são igualmente mostrados no quadro (4.3.).

Quadro 4.3. – Parâmetros necessários para a caracterização do ressalto

Q [l/s]	U_0 [m/s]	D1 [m]	$D2_{teórico}$ [m]	$D2_{medido}$ [m]	U1 [m/s]	Fr_1
0.51	1.091	0.016	0.030	0.031	0.659	1.677
0.71	1.084	0.019	0.038	0.037	0.751	1.739
0.85	1.231	0.021	0.044	0.043	0.811	1.782
0.99	1.369	0.023	0.049	0.052	0.864	1.819
1.17	1.551	0.024	0.058	0.059	0.981	2.022
1.35	1.624	0.025	0.066	0.068	1.096	2.235
1.47	1.497	0.025	0.072	0.073	1.159	2.321
1.65	1.695	0.026	0.079	0.080	1.245	2.445
1.89	1.738	0.029	0.087	0.083	1.305	2.448
2.00	1.815	0.030	0.090	0.089	1.328	2.451

A comparação entre os valores da segunda altura conjugada do ressalto, denota a existência de alguma diferença entre os valores da altura $D2$ obtida através da expressão (2.8.) e medidos com recurso ao sistema flutuador/potenciómetro que poderão eventualmente ser atribuídas à dificuldade de localizar com precisão a secção final do ressalto. No entanto, como se pode verificar pelo gráfico apresentado na figura (4.2.) os valores são bastante semelhantes.

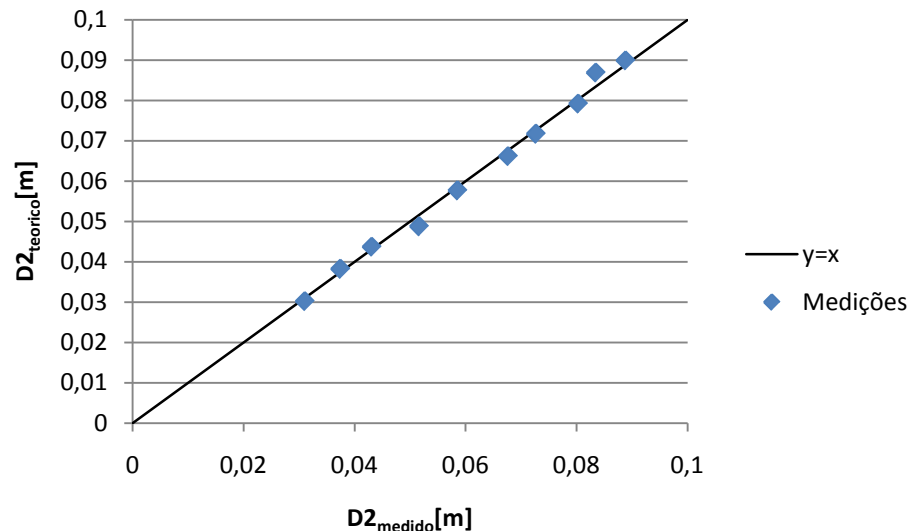


Fig. 4.2. – Comparação de valores de $D2$ medidos com valores teóricos

4.3.2. CARACTERIZAÇÃO DE RESSALTO HIDRÁULICO – PERDA DE ENERGIA

A avaliação dos valores referentes à perda de energia originada no ressalto hidráulico, para as diferentes condições de escoamento, foi feita de acordo com a expressão (2.13) e é apresentada no quadro (4.4), conjuntamente com os valores da energia específicas nas secções de escoamento correspondentes às secções das alturas conjugadas $D1$ e $D2$.

Os valores dos números de Froude registados nos ensaios realizados conduzem, de acordo com a classificação proposta por Peterka (1974), a ressaltos que podem ser considerados fracos. Desta forma, a perda de energia no ressalto, nos presentes ensaios, foi relativamente reduzida.

Quadro 4.4. – Perdas de energia

Q [l/s]	Fr₁	E₁ [m]	E₂ [m]	ΔH [m]
0.51	1.68	0.0378	0.0367	0.0011
0.71	1.74	0.0478	0.0448	0.0029
0.85	1.78	0.0547	0.0511	0.0035
0.99	1.82	0.0610	0.0591	0.0019
1.17	2.02	0.0730	0.0668	0.0062
1.35	2.23	0.0857	0.0757	0.0101
1.47	2.32	0.0939	0.0810	0.0128
1.65	2.44	0.1055	0.0889	0.0166
1.89	2.45	0.1158	0.0939	0.0219
2.00	2.45	0.1199	0.0990	0.0209

Embora as energias nas secções das alturas conjugadas *D1* e *D2* parecerem coerentes para toda a gama de caudais, os valores da perda de energia calculados apresentam algumas discrepâncias. Como se pode verificar, a perda de energia calculada para o caudal de 0,99 l/s está abaixo da perda de energia que se verifica no ressalto hidráulico formado com um caudal de 0,85 l/s. De forma semelhante, a perda de energia decresce do ressalto hidráulico formado com o caudal de 1.89 l/s para o ressalto hidráulico relativo ao caudal de 2 l/s. Tal dever-se-á eventualmente aos valores medidos experimentalmente das alturas conjugadas.

Os valores calculados através das medidas realizadas foram comparados com valores teóricos obtidos através expressões apresentadas no capítulo 2, sendo essa comparação apresentada nos quadros (4.5.) e (4.6.).

Quadro 4.5. – Comparação da perda de energia no ressalto hidráulico com valores teóricos

ΔH [m]	ΔH_{teórico} [m]		
	Bakhmeteff-Matzke	Silvester	Chow
0.0011	0.0016	0.0011	0.0018
0.0029	0.0024	0.0029	0.0022
0.0035	0.0031	0.0035	0.0029
0.0019	0.0038	0.0019	0.0049
0.0062	0.0069	0.0062	0.0073
0.0101	0.0111	0.0101	0.0121
0.0128	0.0136	0.0128	0.0143
0.0166	0.0175	0.0166	0.0184
0.0219	0.0193	0.0219	0.0167
0.0209	0.0200	0.0209	0.0192

Quadro 4.6. – Comparação da eficiência da perda de energia no ressalto hidráulico com valores teóricos

η [%]	η_{teorico} [%]		
	Bakhmeteff-Matzke	Silvester	Chow
2.96	4.25	2.96	4.86
6.08	5.10	6.08	4.61
6.44	5.70	6.44	5.31
3.09	6.25	3.09	8.07
8.56	9.43	8.56	10.05
11.73	13.01	11.73	14.10
13.66	14.47	13.66	15.21
15.78	16.59	15.78	17.39
18.88	16.64	18.88	14.44
17.40	16.70	17.40	16.01

A comparação dos resultados experimentais com os valores obtidos através do gráfico da figura (2.14.), permite concluir que os ressaltos hidráulicos formados são, efectivamente, ressaltos fracos. A eficiência da dissipação de energia nunca excede os 20 %, sendo a eficiência mínima de cerca de 3%, correspondente ao caudal de 0.51 l/s. A eficiência máxima verifica-se para o caudal de 1.89 l/s e é de aproximadamente 19 %. Seria de esperar que o caudal de 2 l/s apresentasse a eficiência máxima de dissipação de energia. Esta situação deve-se provavelmente a erros de medição, decorrentes da dificuldade de definir com precisão as secções de jusante e de montante do ressalto hidráulico. Relativamente à comparação feita com as expressões do quadro (2.15), conclui-se que as expressões utilizadas resultam em valores de perda de energia muito semelhantes entre si. A expressão de Silvester resulta até em valores exactamente iguais aos calculados, uma vez que esta expressão tem como base as expressões do cálculo da energia específica enunciadas na fórmula (2.13). No que se refere aos valores propostos por Bakhmeteff-Matzke, estes situam-se ligeiramente acima dos valores medidos para os caudais de 0.51 l/s, 0.99 l/s, 1.17 l/s, 1.35 l/s, 1.47 l/s e 1.65 l/s, situando-se ligeiramente abaixo nos restantes caudais.

Considerando o método proposto por Chow, verifica-se que os valores apresentam comportamentos semelhantes aos valores resultantes da fórmula de Bakhmeteff-Matzke, no entanto as variações são de ordem de grandeza ligeiramente superior.

4.3.3. CARACTERIZAÇÃO DO RESSALTO HIDRAULICO – COMPRIMENTOS E LOCALIZAÇÃO

Na definição do comprimento do ressalto dever-se-á distinguir entre o comprimento da zona de escoamento em que se verifica a maior turbulência designada, já referido por comprimento do “rolo”, L_r e o comprimento da parte de escoamento em que o efeito do ressalto se faz sentir, L_j , a qual se prolonga para além da primeira.

Como já foi referido, a definição da secção do escoamento em que se verifica o final do ressalto é difícil de estabelecer de uma forma concisa e objectiva, podendo originar desvios nos valores fixados para L_j em relação à realidade. No entanto foi feita uma tentativa de determinar visualmente os valores de L_j para as diferentes condições de escoamento, tendo sido, de seguida, estes valores comparados com os obtidos através de métodos apresentados na literatura para definir os comprimentos L_j e L_r .

Em primeira análise foi utilizado um ábaco disponível na literatura que relaciona os valores de Fr_1 com a relação $Lj/D1$. Este ábaco é válido para uma soleira sem acessórios, como é o caso no presente estudo.

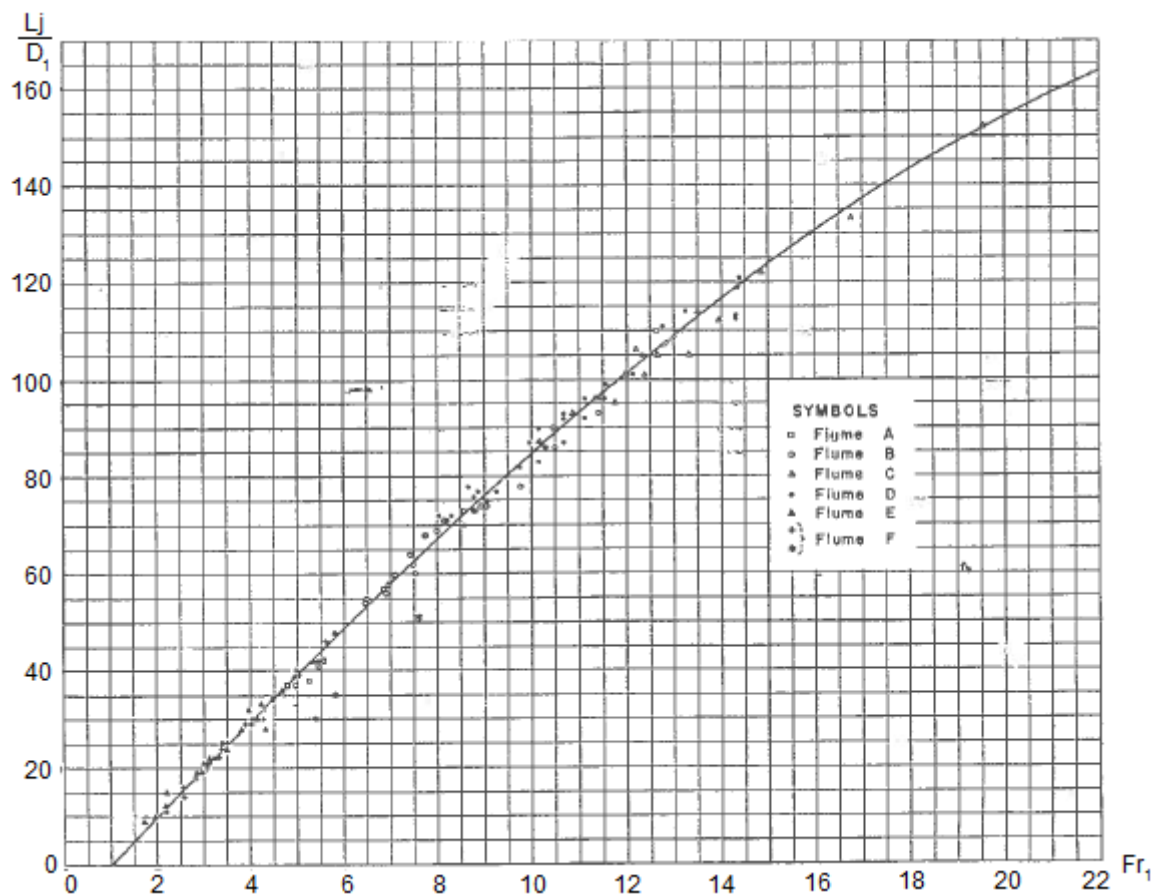


Fig. 4.3. – Ábaco para o cálculo do comprimento do ressalto hidráulico (Fonte: Peterka (1978))

Os valores medidos de Lj e os valores teóricos obtidos através do gráfico anteriormente referido são apresentados no quadro (4.7.).

Quadro 4.7. – Comprimentos para o ressalto hidráulico

Q [l/s]	Fr ₁	L/D1	D1 [m]	L _{j medido} [cm]	L _{j ábaco} [cm]
0.51	1.677	6.1	0.016	9.7	9.6
0.71	1.739	7.7	0.019	14.1	14.6
0.85	1.782	8.1	0.021	16.2	17.1
0.99	1.819	8.3	0.023	17.3	19.1
1.17	2.022	10.0	0.024	24.1	24.0
1.35	2.235	12.1	0.025	28.5	29.7
1.47	2.321	13.0	0.025	30.0	33.0
1.65	2.445	14.6	0.026	35.0	38.6
1.89	2.448	14.7	0.029	37.1	42.6
2.00	2.451	14.8	0.030	41.8	44.3

É de notar que à medida que os caudais aumentam, se verifica uma diferença maior entre os comprimentos medidos visualmente, $L_{j\text{ medido}}$ relativamente aos obtidos pelo ábaco. Este facto parece reforçar a ideia de que os efeitos do ressalto são sentidos para além da extensão aparente deste.

De seguida foi feita uma comparação entre os valores medidos, $L_{j\text{ medido}}$ e os valores de L_j , obtidos utilizando várias expressões disponíveis na literatura, valores que são apresentados, para uma maior facilidade de leitura nos quadros (4.8) a (4.11). Com vista a uma análise complementar, foi ainda estabelecida uma relação entre os comprimentos, L_j , do ressalto e o número de Froude, que é apresentada igualmente nas figuras (4.4.) a (4.7). As diferenças observadas entre os valores obtidos através das fórmulas propostas pelos diferentes autores resultam, por um lado da dificuldade em definir com precisão a secção de jusante do ressalto hidráulico, e por outro, devido às diferenças das condições de teste em que cada autor desenvolveu a sua metodologia.

Quadro 4.8. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido

Q [l/s]	D1 [cm]	D2 [cm]	Fr ₁	Lj [cm]			Lj _{medido} [cm]
				Marques	Riegel, Beebe	Woyciki	
0.51	1.57	3.10	1.68	13.01	7.65	12.10	9.59
0.71	1.90	3.74	1.74	15.67	9.22	14.57	14.63
0.85	2.11	4.31	1.78	18.65	10.97	17.33	17.11
0.99	2.30	5.16	1.82	24.30	14.30	22.55	19.09
1.17	2.40	5.85	2.02	29.36	17.27	27.21	23.99
1.35	2.45	6.76	2.23	36.65	21.56	33.90	29.66
1.47	2.54	7.27	2.32	40.16	23.62	37.12	33.04
1.65	2.65	8.03	2.44	45.75	26.91	42.24	38.62
1.89	2.90	8.35	2.45	46.31	27.24	42.80	42.60
2.00	2.99	8.88	2.45	50.04	29.43	46.22	44.30

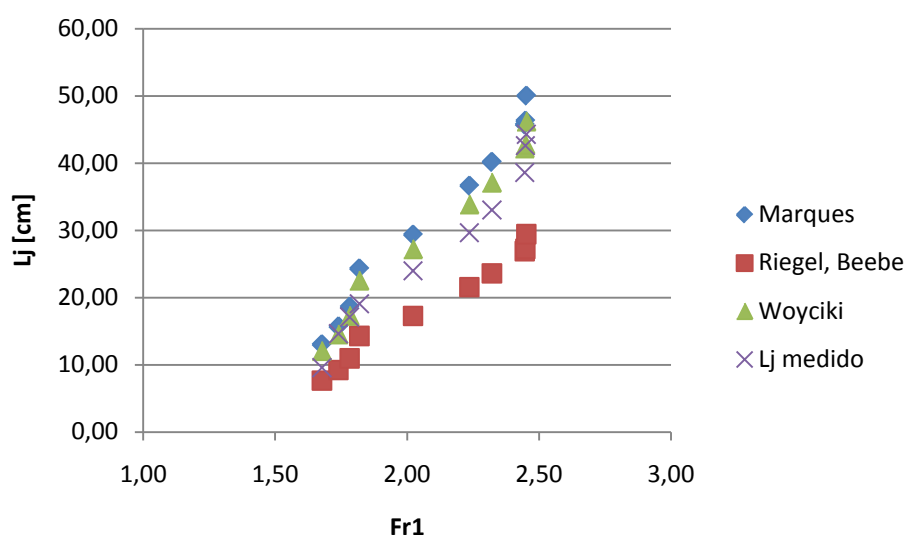


Fig. 4.4. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico

Quadro 4.9. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido

Q [l/s]	D1 [cm]	D2 [cm]	Fr1	Lj [cm]			Lj _{medido} [cm]
				Bahkmeteff-Matzke	Kinney	Wu	
0.51	1.57	3.10	1.68	7.65	9.22	14.09	9.59
0.71	1.90	3.74	1.74	9.22	11.10	16.88	14.63
0.85	2.11	4.31	1.78	10.97	13.21	20.01	17.11
0.99	2.30	5.16	1.82	14.30	17.21	25.98	19.09
1.17	2.40	5.85	2.02	17.27	20.79	30.86	23.99
1.35	2.45	6.76	2.23	21.56	25.96	37.91	29.66
1.47	2.54	7.27	2.32	23.62	28.44	41.29	33.04
1.65	2.65	8.03	2.44	26.91	32.40	46.65	38.62
1.89	2.90	8.35	2.45	27.24	32.80	47.21	42.60
2.00	2.99	8.88	2.45	29.43	35.44	51.00	44.30

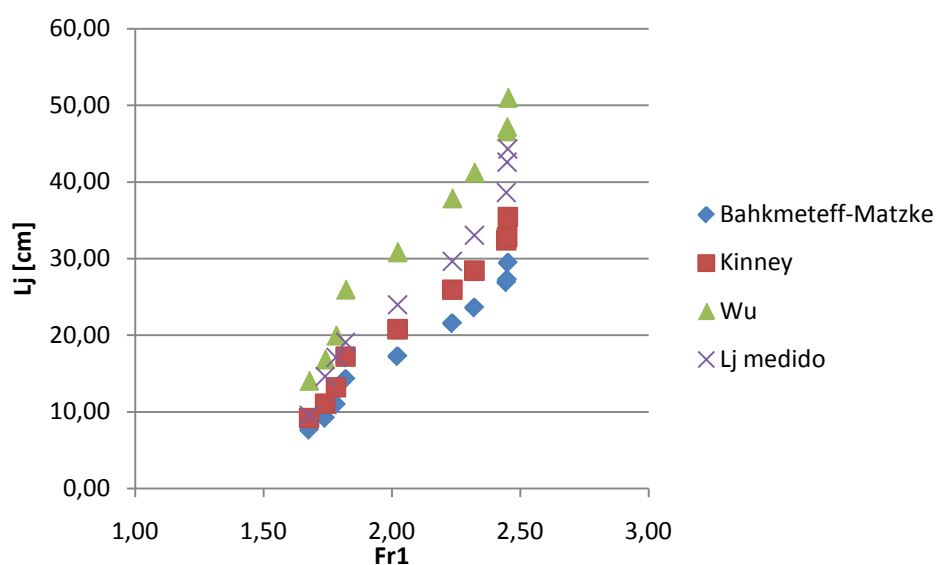


Fig. 4.5. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico

Quadro 4.10. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido

Q [l/s]	D1 [cm]	D2 [cm]	Fr1	Lj [cm]			Lj _{medido} [cm]
				Smetana	Chetoussov	Aravin	
0.51	1.57	3.10	1.68	9.18	11.80	8.27	9.59
0.71	1.90	3.74	1.74	11.06	15.33	9.96	14.63
0.85	2.11	4.31	1.78	13.17	17.83	11.85	17.11
0.99	2.30	5.16	1.82	17.16	20.14	15.44	19.09
1.17	2.40	5.85	2.02	20.73	25.14	18.65	23.99
1.35	2.45	6.76	2.23	25.87	29.95	23.28	29.66
1.47	2.54	7.27	2.32	28.35	32.79	25.51	33.04
1.65	2.65	8.03	2.44	32.29	36.71	29.06	38.62
1.89	2.90	8.35	2.45	32.69	40.28	29.42	42.60
2.00	2.99	8.88	2.45	35.32	41.69	31.79	44.30

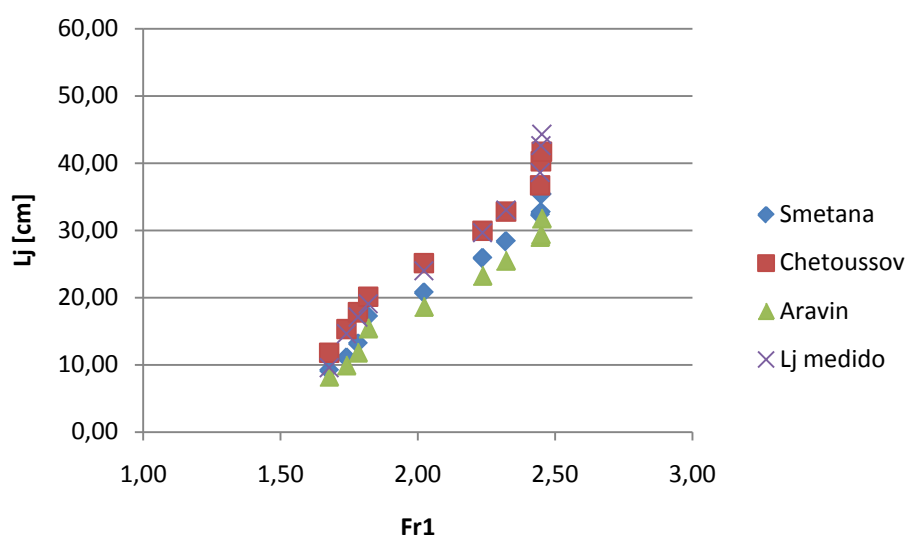


Fig. 4.6. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico

Quadro 4.11. – Comparação do comprimento do ressalto hidráulico teórico com o medido

Q [l/s]	D1 [cm]	D2 [cm]	Fr1	Lj [cm]		Lj _{medido} [cm]
				Elevatorski	Silvester	
0.51	1.57	3.10	1.68	10.56	10.33	9.59
0.71	1.90	3.74	1.74	12.72	13.66	14.63
0.85	2.11	4.31	1.78	15.14	16.06	17.11
0.99	2.30	5.16	1.82	19.73	18.32	19.09
1.17	2.40	5.85	2.02	23.83	23.90	23.99
1.35	2.45	6.76	2.23	29.75	29.57	29.66
1.47	2.54	7.27	2.32	32.60	32.82	33.04
1.65	2.65	8.03	2.44	37.13	37.40	38.62
1.89	2.90	8.35	2.45	37.60	41.06	42.60
2.00	2.99	8.88	2.45	40.62	42.52	44.30

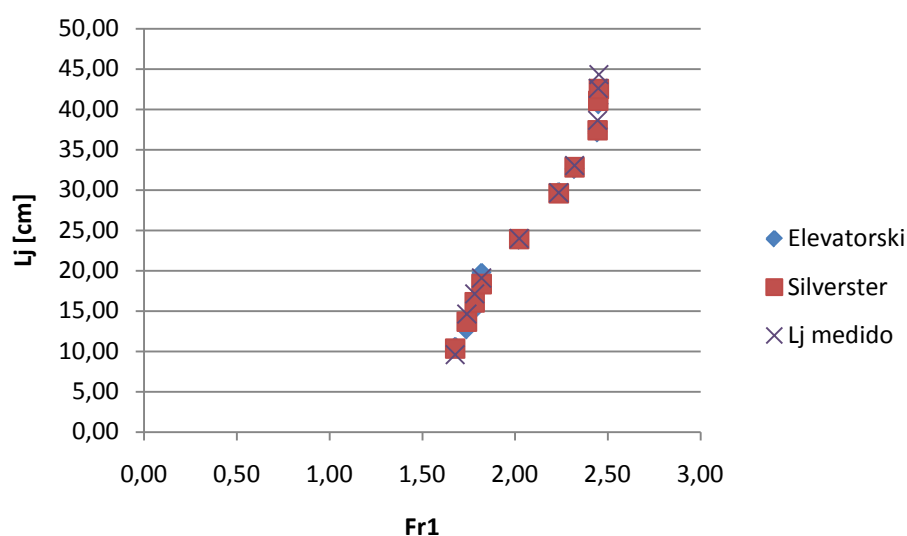


Fig. 4.7. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico

Os valores medidos apresentam uma semelhança notável com os resultantes das fórmulas propostas por Chetoussev, Elevatorski e Silvester, cuja definição de L_j é feita em tendo como objectivo a definição da secção a partir da qual não há variação de níveis de água, sendo no entanto inferiores a valores sugeridos por outros autores, como por exemplo Marques, que estabelece como comprimento

do ressalto o limite para além do qual já se não fazem sentir as acções do ressalto. É ainda de notar que todos os métodos apresentam uma distribuição semelhante relativa ao número de Froude.

A metodologia proposta por Simões e Porto pressupõe descarregadores de degraus de forte declive, bem como a consideração de um coeficiente de resistência de valores substancialmente diferentes dos que se correspondem aos ensaios agora realizados. Foram utilizadas as expressões (2.9.) a (2.12.), propostas pelos autores e apresentadas no capítulo 2. A utilização da expressão (2.9.) que, recorrendo aos factores Ψ_1 e Ψ_2 , permite introduzir os valores dos coeficientes de resistência encontrados por Antunes (2011) conduziu a resultados aproximados aos valores medidos. A expressão simplificada, (2.12.), que utiliza os valores médios dos coeficientes de resistência considerados pelos autores da mesma, permitiu chegar a valores substancialmente acima dos valores medidos, bem como dos valores propostos pelos outros autores mencionados. Os resultados são apresentados na tabela (4.12).

Quadro 4.12. – L_j segundo Simões e Porto e comparação com $L_{j\text{medido}}$

Q [l/s]	q [m ² /s]	Expressão (2.12)	f	Ψ_1	Ψ_2	Expressão (2.9.)	$L_{j\text{medido}}$ [m]
		L_j [m]				L_j [m]	
0.51	0.01	0.36	0.45	7.64	-0.87	0.28	0.10
0.71	0.01	0.44	0.49	6.13	-0.82	0.32	0.15
0.85	0.02	0.50	0.49	6.13	-0.82	0.35	0.17
0.99	0.02	0.55	0.49	6.13	-0.82	0.38	0.19
1.17	0.02	0.62	0.49	6.13	-0.82	0.42	0.24
1.35	0.03	0.67	0.49	6.13	-0.82	0.45	0.30
1.47	0.03	0.70	0.49	6.13	-0.82	0.47	0.33
1.65	0.03	0.76	0.49	6.13	-0.82	0.50	0.39
1.89	0.04	0.83	0.49	6.13	-0.82	0.54	0.43
2.00	0.04	0.85	0.49	6.13	-0.82	0.56	0.44

Se for utilizado, na expressão (2.7.), um factor de resistência de 0,20 para todos os caudais, como proposto por Simões (2008), observa-se que os comprimentos do ressalto obtidos assumem valores realistas, embora substancialmente superiores aos valores registados experimentalmente, com se poder ver no quadro (4.13.).

Quadro 4.13. – Comparação entre os valores medidos e teóricos para o ressalto hidráulico

Q [l/s]	q [m ² /s]	f	Ψ_1	Ψ_2	Expressão (2.9)	$L_{j\text{medido}}$ [m]
					L_j [m]	
0.51	0.01	0.20	13.20	-0.97	0.32	0.01
0.71	0.01	0.20	13.20	-0.97	0.40	0.15
0.85	0.02	0.20	13.20	-0.97	0.46	0.17
0.99	0.02	0.20	13.20	-0.97	0.51	0.19
1.17	0.02	0.20	13.20	-0.97	0.57	0.24
1.35	0.03	0.20	13.20	-0.97	0.62	0.30

1.47	0.03	0.20	13.20	-0.97	0.64	0.33
1.65	0.03	0.20	13.20	-0.97	0.70	0.39
1.89	0.04	0.20	13.20	-0.97	0.77	0.43
2.00	0.04	0.20	13.20	-0.97	0.79	0.44

Como foi dito a metodologia proposta por Simões e Porto, foi, desenvolvida experimentalmente num modelo de descarregador de declive significativamente superior àquele que foi utilizado no presente estudo. Apesar de terem sido feitas algumas considerações com o intuito de adaptar este método ao presente caso, a sua aplicabilidade não é total, pelo que os valores devem ser considerados meramente indicativos. Em relação ao comprimento do rolo, L_r , os resultados diferem bastante entre si. São apresentados de seguida os resultados obtidos através das expressões existentes na literatura e anteriormente referidas no capítulo 2.

Quadro 4.14. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo

Q [l/s]	D1 [cm]	D2 [cm]	Fr1	Lr [cm]			Lj _{medido} [cm]
				Marques	Safranez	Pietrkowski	
0.51	1.57	3.10	1.68	9.18	15.82	15.55	9.59
0.71	1.90	3.74	1.74	11.06	19.83	19.50	14.63
0.85	2.11	4.31	1.78	13.17	22.59	22.21	17.11
0.99	2.30	5.16	1.82	17.16	25.10	24.68	19.09
1.17	2.40	5.85	2.02	20.73	29.10	28.62	23.99
1.35	2.45	6.76	2.23	25.87	32.87	32.32	29.66
1.47	2.54	7.27	2.32	28.35	35.39	34.80	33.04
1.65	2.65	8.03	2.44	32.29	38.80	38.16	38.62
1.89	2.90	8.35	2.45	32.69	42.56	41.85	42.60
2.00	2.99	8.88	2.45	35.32	44.03	43.29	44.30

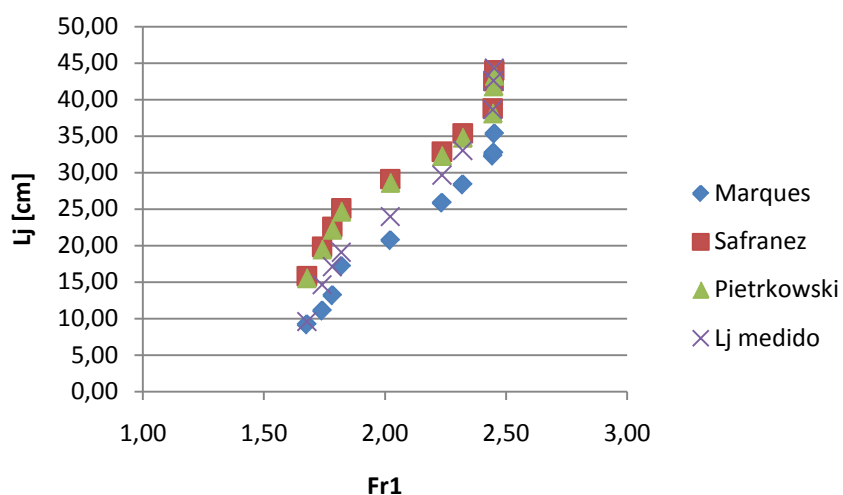


Fig. 4.8. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo

Quadro 4.15. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo

Q [l/s]	D1 [cm]	D2 [cm]	Fr1	Lr [cm]			Lj medido [cm]
				Sarma e Newnham	Newnham	Douma	
0.51	1.57	3.10	1.68	7.38	4.55	9.31	9.59
0.71	1.90	3.74	1.74	11.26	4.98	11.23	14.63
0.85	2.11	4.31	1.78	13.16	5.26	12.92	17.11
0.99	2.30	5.16	1.82	14.68	5.51	15.48	19.09
1.17	2.40	5.85	2.02	18.45	6.88	17.56	23.99
1.35	2.45	6.76	2.23	22.81	8.31	20.29	29.66
1.47	2.54	7.27	2.32	25.42	8.89	21.80	33.04
1.65	2.65	8.03	2.44	29.71	9.72	24.08	38.62
1.89	2.90	8.35	2.45	32.77	9.74	25.04	42.60
2.00	2.99	8.88	2.45	34.08	9.77	26.64	44.30

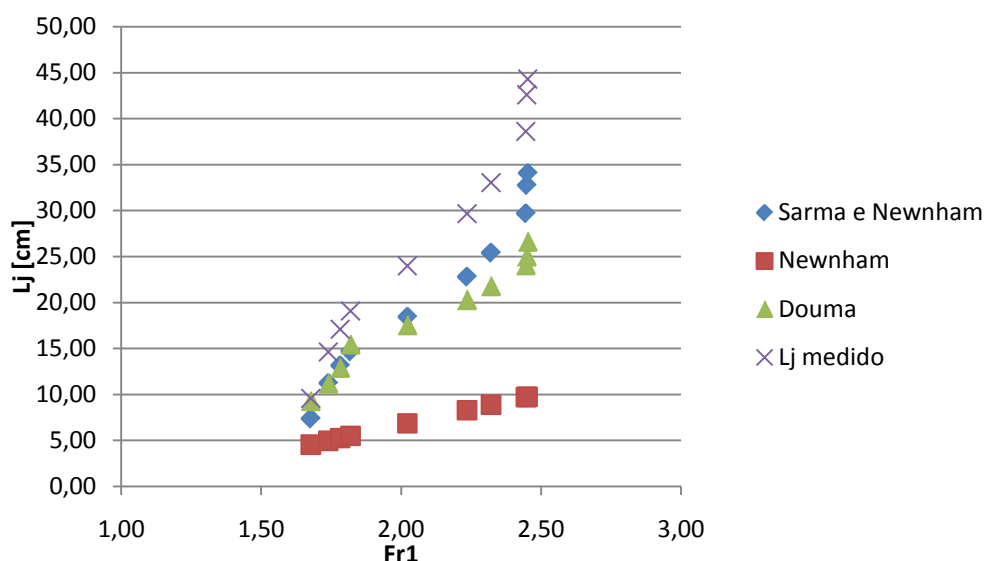


Fig. 4.9. – Comparação entre os valores medidos para o comprimento do ressalto hidráulico e valores teóricos para o comprimento do rolo

Verifica-se novamente que a maioria das expressões, com excepção da fórmula proposta por Newnham, seguem uma relação semelhante em função do número de Froude.

Apesar de não terem sido feitas expressamente medições relativas ao comprimento do rolo, pode-se afirmar que visualmente aparentavam ser bastante inferiores ao comprimento do ressalto medido. Verifica-se ao analisar os resultados, por um lado a dificuldade em determinar visualmente o comprimento do ressalto e por outro lado a disparidade entre a interpretação e a definição desse mesmo comprimento pelos diferentes investigadores que se dedicaram a este assunto.

Realçando este facto, apresenta-se de seguida a comparação dos diferentes valores dos comprimentos do rolo calculados pelas diferentes expressões sugeridas pelos diferentes autores, bem como a sua comparação com os valores experimentais considerados como comprimento de ressalto.

Assim, os comprimentos de rolo calculados pelas fórmulas de Marques, Safranez e Pietrkowski, muito semelhantes entre si, aproximam-se consideravelmente dos comprimentos do ressalto medidos no laboratório. No que se refere ao comprimento do rolo, segundo Sarma e Newnham apresenta algumas semelhanças com o comprimento do rolo avaliado por Douma e, para os cinco caudais mais baixos dos presentes ensaios, os valores medidos de L_j são cerca de 30% superiores aos valores calculados pelas expressões sugeridas pelos referidos autores. Para os restantes caudais, verifica-se um afastamento gradual desta relação para os valores resultantes da análise segundo Douma, mantendo-se essa mesma relação para os valores obtidos através das expressões propostas por Sarma e Newnham. A aplicação da expressão proposta por Newnham resulta em valores que diferem completamente dos restantes, sendo obtida por relação linear com o número de Froude. Os comprimentos do rolo resultantes do cálculo são muito menores que o comprimento do rolo dos outros autores e afastando-se muito dos comprimentos do ressalto medidos, sendo cerca de cinco vezes mais baixo para o caudal de 2 l/s.

4.3.4. – LOCALIZAÇÃO DO INÍCIO DO RESSALTO EM RELAÇÃO À SECÇÃO DE JUSANTE DO DESCARREGADOR

Devido às condições dos escoamentos em estudo, provenientes do descarregador de degraus, fez-se uma análise dessas condições de escoamento, na sua secção de jusante, no sentido de determinar a posição das secções de impacto das veias líquidas descarregadas com o escoamento no canal de descarga onde se fará a dissipação.

Considerando que a descarga na secção de usante se assemelha a um jacto e de modo a avaliar a trajectória desse jacto foram calculados o alcance teórico e o ângulo de incidência do jacto com o colchão de água a jusante que se considerou ser a profundidade da água no ponto de impacto, isto é, a altura conjugada $D1$. Os resultados apresentam-se no quadro seguinte onde são apresentados valores do alcance teórico, Lt , assim como do ângulo de incidência do jacto no escoamento, θ' .

Quadro 4.16. – Alcance e ângulo de incidência do jacto

Q [l/s]	U_0 [m/s]	H_0 [m]	H_1 [m]	$D1$ [m]	Lt [m]	θ' [graus]
0.51	1.106	0.072	0.022	0.016	0.074	30.585
0.71	1.084	0.073	0.018	0.019	0.058	33.528
0.85	1.231	0.092	0.016	0.021	0.062	30.680
0.99	1.369	0.109	0.015	0.023	0.065	28.748
1.17	1.551	0.138	0.014	0.024	0.073	27.046
1.35	1.624	0.150	0.013	0.025	0.076	26.439
1.47	1.497	0.134	0.012	0.025	0.069	26.616
1.65	1.695	0.162	0.011	0.026	0.076	25.428
1.89	1.738	0.177	0.009	0.029	0.075	24.275
2.00	1.815	0.191	0.008	0.030	0.078	23.735

Os resultados calculados referem-se à secção média do jacto de saída. A observação dos escoamentos permitiu a definição das secções de início dos ressaltos, através da sua distância à secção de saída do descarregador, L_i , e a sua comparação com os valores calculados. De forma a realizar uma estimativa do ponto de alcance máximo do jacto, Lt_{max} , correspondente à sua extremidade de jusante, foi admitido que não haveria dispersão do jacto. Como já referido o escoamento, no descarregador de degraus, processa-se de forma diferente de acordo com o caudal descarregado. De acordo com as condições de escoamento enunciadas anteriormente, considerou-se que o ângulo de saída do jacto seria de 0 graus para o caudal de 0,51 l/s, sendo de -21,04 graus para os restantes. O quadro (4.17.) apresenta essa comparação.

Quadro 4.17. – Secção inicial dos ressaltos face ao alcance máximo do jacto

Q [l/s]	Lt [m]	Lt_{max} [m]	L_i [m]
0.51	0.062	0.090	0.070
0.71	0.058	0.070	0.070
0.85	0.062	0.080	0.070
0.99	0.065	0.090	0.100
1.17	0.073	0.100	0.130
1.35	0.076	0.110	0.140
1.47	0.069	0.100	0.140

1.65	0.076	0.110	0.140
1.89	0.075	0.120	0.150
2.00	0.078	0.120	0.150

É de notar que para os caudais mais baixos (até 0.85 l/s) as distâncias para o início do ressalto hidráulico aparentam ser inferiores às do alcance do jacto. Para estes caudais as flutuações do caudal induziam grandes variações na forma do jacto pelo que visualmente foi muito difícil definir com precisão o ponto de impacto da extremidade de jusante do jacto. Também, e como já referido, não foi tida em conta nos cálculos efectuados a dispersão do jacto e consequentemente a deslocação do seu extremo de jusante na direcção de jusante, o que poderá, eventualmente, justificar os resultados medidos por observação do escoamento.

4.4. ENSAIOS EM FUNDO MÓVEL

Uma vez analisados os escoamentos em fundo fixo, procedeu-se à substituição por fundo móvel do fundo do canal situado na secção de jusante do descarregador. Como já foi referido, o canal tinha sido preparado para a fácil remoção da placa de perspex que constituía o seu fundo e o enchimento da cavidade situada inferiormente com material granular.

Foram realizados ensaios com três materiais distintos, de características já apresentadas no capítulo 2 deste trabalho. O primeiro material utilizado, designado por areia, pretendeu simular o material constituinte do curso de água natural, que foi suposto ser mantido no canal onde se pretende dissipar a energia residual do escoamento proveniente do descarregador. Seguidamente utilizaram-se dois materiais diferentes de dimensões sucessivamente crescentes, designados por brita 5/15 e brita 9,5/19 cujos comportamentos se analisaram.

Os objectivos destes ensaios foram:

- 1- A caracterização das fossas de erosão, através da definição do seu perfil longitudinal e a comparação das profundidades máximas registadas com valores obtidos com utilização de expressões sugeridas por diferentes autores referidos na pesquisa bibliográfica feita.
- 2- A análise de forma objectiva, através das fossas de erosão originadas, dos efeitos da descarga dos diferentes caudais e do correspondente ressalto formado, no leito do canal, permitindo comparar extensão de fossas com os comprimentos de ressalto anteriormente estipulados. Foi ainda neste ponto julgado de particular interesse, em virtude das características das fossas, considerar a eventualidade de se poder estabelecer uma relação entre escoamento à saída do descarregador com uma descarga por jacto.
- 3- A análise do comportamento dos diferentes materiais constituintes do leito do canal, face às descargas dos caudais correspondentes às diferentes condições de ensaio e sugestão, com base na análise dos resultados dos ensaios de uma solução para protecção do fundo do canal a jusante do descarregador de degraus.

Os ensaios foram realizados para cada um dos três materiais acima referidos e para todas as condições de escoamento referidas. Para que todos os ensaios fossem processados de forma idêntica houve o cuidado de, no início de cada condição de ensaio, remexer o material e nivelá-lo de seguida.

4.4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS FOSSAS DE EROSÃO

O perfil de cada fossa de erosão foi definido utilizando a técnica anteriormente referida no capítulo 3, a qual permitiu definir para cada ponto de medida situado à distância a , do início da bacia de dissipação definir a profundidade f da fossa de erosão. Nas figuras (4.10.) a (4.12.) apresentam-se os perfis das fossas de erosão para os três materiais ensaiados e para as todas condições de escoamento referidas.

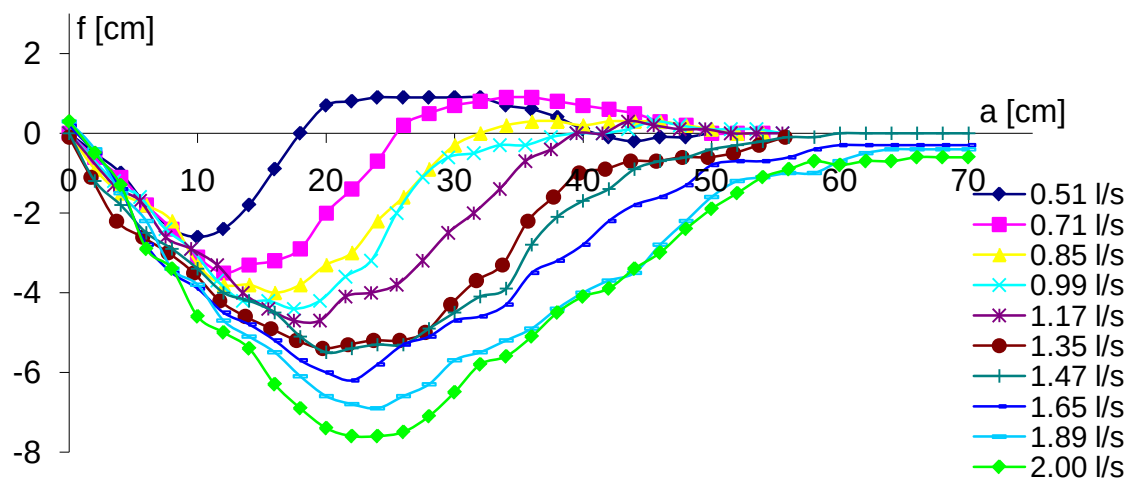


Fig. 4.10. – Perfil das fossas de erosão relativas ao leito em areia

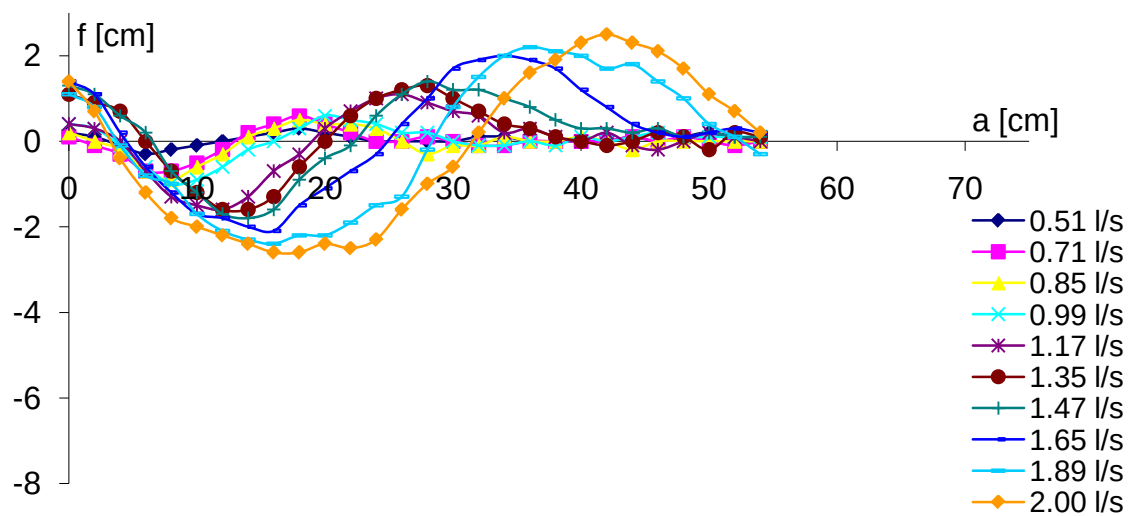


Fig. 4.11. – Perfil das fossas de erosão relativas ao leito em brita 5/15

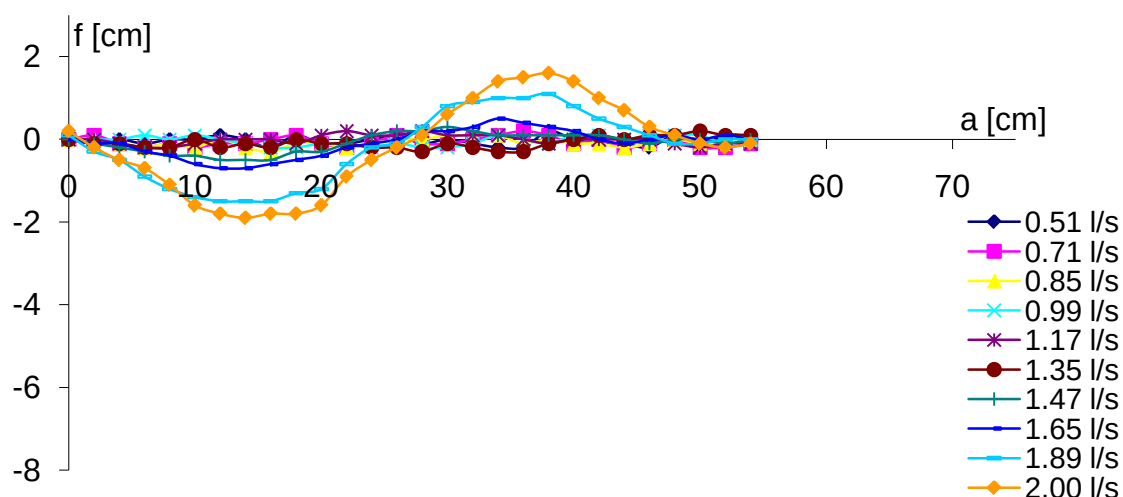


Fig. 4.12. – Perfil das fossas de erosão relativas ao leito em brita 9.5/19

O quadro (4.18.) apresenta, a título de exemplo, os resultados obtidos para o caudal de 0,51 l/s, com o fundo constituído pelo material de dimensões mais reduzidas (areia), sendo as tabelas referentes aos restantes caudais apresentadas em anexo. Os valores de f foram obtidos como descrito no capítulo 3 e considerando um valor de T de 8.9 cm.

Quadro 4.18. – Exemplo de levantamento de perfil para o caudal de 0,51 l/s.

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0
1	2	9.4	0.5
2	4	9.9	1.0
3	6	10.7	1.8
4	8	11.3	2.4
5	10	11.5	2.6
6	12	11.3	2.4
7	14	10.7	1.8
8	16	9.8	0.9

9	18	8.9	0.0
10	20	8.2	-0.7
11	22	8.1	-0.8
12	24	8.0	-0.9
13	26	8.0	-0.9
14	28	8.0	-0.9
15	30	8.0	-0.9
16	32	8.0	-0.9
17	34	8.2	-0.7
18	36	8.3	-0.6
19	38	8.5	-0.4
20	40	8.8	-0.1
21	42	9.0	0.1
22	44	9.1	0.2
23	46	9.0	0.1
24	48	9.0	0.1
25	50	8.9	0.0
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

A análise dos perfis das fossas de erosão nas diferentes situações permitiu a definição das profundidades máximas, designadas por $Z_{\max}$ em cada caso. Nos quadros seguintes apresentam-se para cada material considerado e para cada caudal descarregado os valores obtidos, no modelo e o correspondente valor no protótipo.

Quadro 4.19. – Profundidades máximas das fossas de erosão para o leito em areia

Q [l/s]	$Z_{\max}$ [cm]	$Z_{\max}$ prototipo [m]
0.51	2.6	1.04
0.71	3.5	1.4
0.85	3.8	1.52
0.99	4.4	1.76
1.17	4.7	1.88

1.35	5.4	2.16
1.47	5.4	2.16
1.65	6.2	2.48
1.89	6.9	2.76
2.00	7.6	3.04

Quadro 4.20. – Profundidades máximas das fossas de erosão para o leito em brita 5/15

Q [l/s]	$z_{\max}$ [cm]	$z_{\max}$ prototipo [m]
0.51	0.30	0.12
0.71	0.70	0.28
0.85	0.90	0.36
0.99	1.00	0.4
1.17	1.60	0.64
1.35	1.60	0.64
1.47	1.80	0.72
1.65	2.10	0.84
1.89	2.40	0.96
2.00	2.60	1.04

Quadro 4.21. – Profundidades máximas das fossas de erosão para o leito em brita 9,5/19

Q [l/s]	$z_{\max}$ [cm]	$z_{\max}$ prototipo [m]
0.51	0.20	0.08
0.71	0.20	0.08
0.85	0.30	0.12
0.99	0.20	0.08
1.17	0.20	0.08
1.35	0.30	0.12
1.47	0.50	0.2
1.65	0.70	0.28
1.89	1.50	0.6

2.00 1.90 0.76

Pode verificar-se que para a areia, a profundidade máxima das fossas de erosão, $Z_{\max}$, atinge valores significativos, como pode ser confirmado nos valores adaptados ao protótipo. É ainda notável que para os caudais mais altos, não se forma uma acumulação de material a jusante do ressalto, sendo todo este transportado pelo escoamento., devido às elevadas velocidades médias atingidas no canal que constitui a bacia de dissipação. Na brita 5/15, as fossas ainda são consideráveis, embora de dimensões substancialmente inferiores às da areia. Relativamente à brita 9,5/19 verificaram-se já fossas de dimensões reduzidas. Para os caudais de 0,51 até 1,35 l/s não se registaram quaisquer perturbações no leito. As profundidades medidas resultaram unicamente do tipo de medição e da granulometria do material, provocando irregularidades no leito do canal.

Como se pode ver pela análise dos perfis das fossas de erosão, estas apresentam características muito diversas para cada um dos três materiais utilizados no leito. O final da fossa foi definido como o ponto em que o perfil atravessa a cota de referência do leito, isto é, o ponto em que $f=0$. No caso específico da areia, e para os caudais mais altos (1,35 a 2 l/s) verifica-se que o leito apresenta uma certa profundidade em toda a extensão do canal. Para estes casos foi definido o final da fossa como o ponto a partir do qual o leito assume uma posição horizontal, mantendo-se com o nível constante.

No quadro 4.22. apresentam-se, para todas as condições de escoamento ensaiadas, os comprimentos de fossa, L_f , medidos, bem como a sua comparação com a localização da secção do canal onde se verificou, de acordo com a observação dos escoamentos feita, o fim do ressalto hidráulico. De notar que o valor de L_f é medido desde o início do canal, pelo que a localização da secção onde se verifica o fim do ressalto, L_{total} deverá ser obtida adicionando a cada $L_{j_{\text{medido}}}$ o correspondente valor de L_i , apresentado no quadro (4.17).

Quadro 4.22. – Comprimentos das fossas de erosão, L_f , face à localização da secção correspondente ao fim do ressalto hidráulico

Q [l/s]	Lf [cm]			Li [cm]	Lj _{medido} [m]	L _{total} [m]
	Areia	Brita 5/15	Brita 9.5/19			
0.51	18.00	12.00	0.00	6.70	9.59	16.29
0.71	25.50	13.00	0.00	6.70	14.63	21.33
0.85	32.00	13.50	0.00	6.90	17.11	24.01
0.99	40.00	16.00	0.00	9.50	19.09	28.59
1.17	40.00	19.00	0.00	13.10	23.99	37.09
1.35	56.00	20.00	0.00	13.70	29.66	43.36
1.47	59.00	22.50	23.00	13.70	33.04	46.74
1.65	60.00	25.00	26.00	14.00	38.62	52.62
1.89	64.00	28.50	26.50	14.50	42.60	57.10
2.00	66.00	31.50	27.50	14.70	44.30	59.00

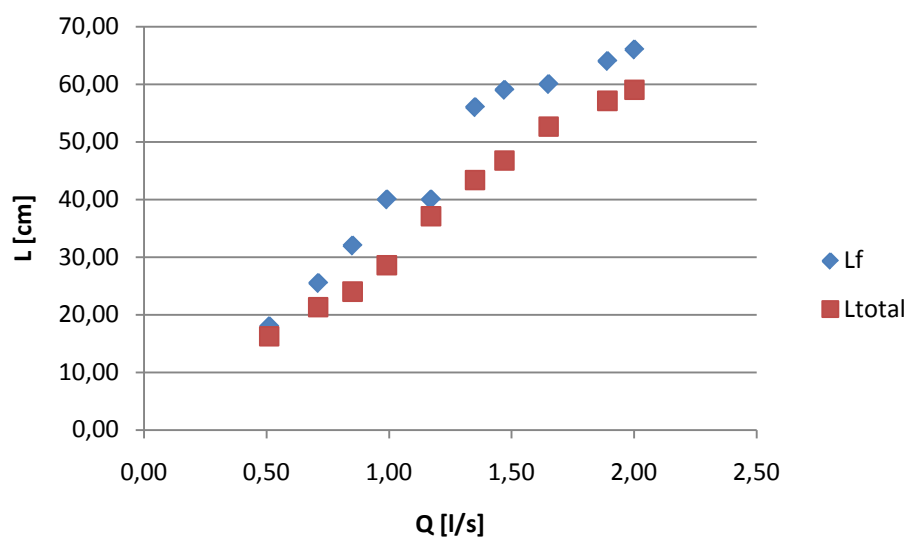


Fig. 4.13. – Comprimento das fossas de erosão verificadas no leito composto por areia, face à localização do fim do ressalto

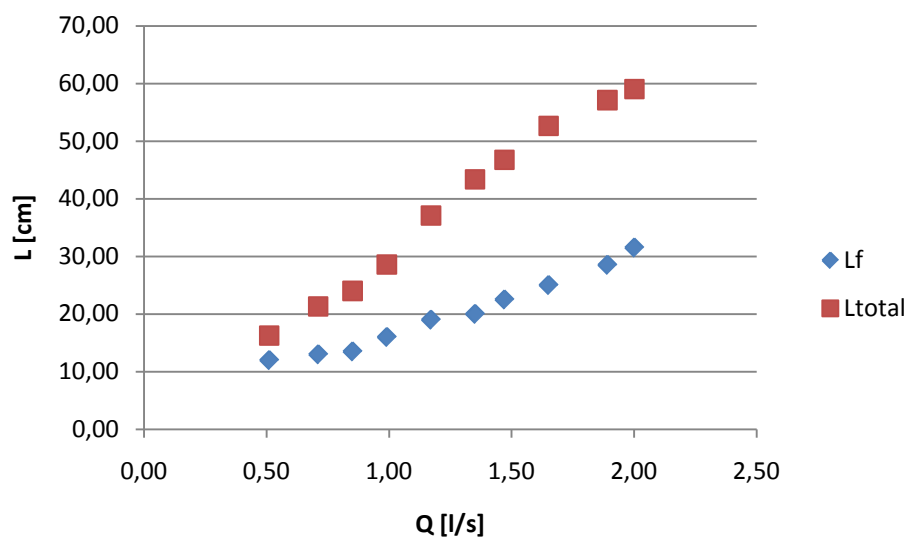


Fig. 4.14. – Comprimento das fossas de erosão verificadas no leito composto por brita 5/15, face à localização do fim do ressalto

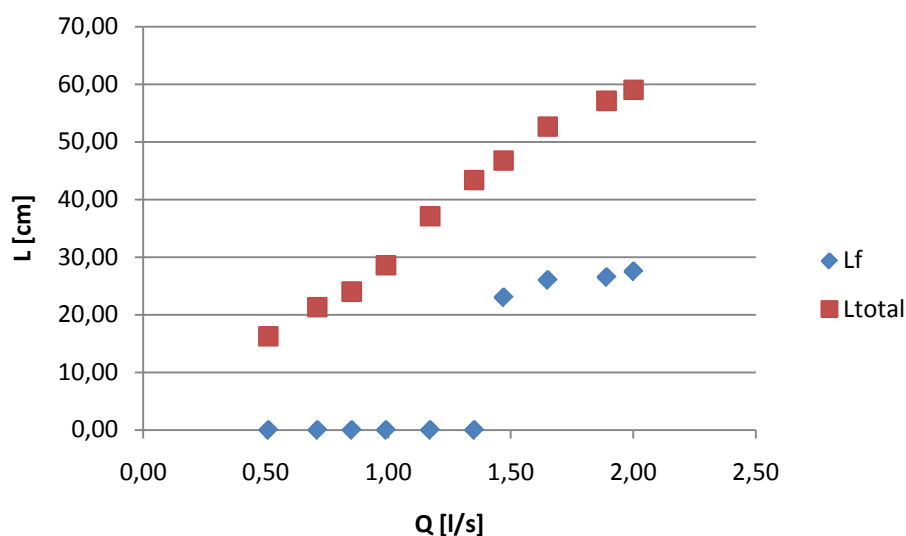


Fig. 4.15. – Comprimento das fossas de erosão verificadas no leito composto por brita 9.5/19, face à localização do fim do ressalto

A comparação do comprimento das fossas de erosão com as localizações das secções em que se supôs ser o final do ressalto hidráulico permitirá apenas concluir que se o efeito do fenómeno hidráulico se se faz sentir numa extensão maior que a admitida para o ressalto hidráulico, o valor considerado estará muito provavelmente por defeito, não se podendo no entanto definir o comprimento da fossa de erosão como estabelecendo o limite para a acção do ressalto hidráulico. De facto esse efeito depende não só das características do ressalto mas também das características do material constituinte do leito onde o fenómeno ocorre.

Assim, comparando os valores dos comprimentos das fossas de erosão com a localização da secção onde se estabeleceu ocorrer o final do ressalto hidráulico verifica-se, no caso da areia, que as fossas de erosão apresentam, invariavelmente, uma extensão superior ao comprimento medido do ressalto, o que significa que para este tipo de material, assumido como simulando o constituinte do leito do curso de água, o efeito do ressalto hidráulico se estende para além do comprimento estipulado nas medições realizadas, dando razão a alguns dos autores, anteriormente citados, cujas expressões para o cálculo daquele parâmetro conduziram a valores superiores àqueles valores medidos.

Para a brita 5/15, o material permitiu ainda que se formassem fossas de erosão, embora de dimensões inferiores às da areia. As suas extensões verificaram-se serem sempre inferiores às do comprimento desde o início do canal até à localização estipulada para final do ressalto, o que traduz o efeito das características do material do fundo interagindo com as características do escoamento. Na brita 9,5/19, como já foi referido, não se verifica a formação de qualquer fossa para os caudais inferiores a 1,47 l/s. Isto indica que a acção do escoamento não é forte o suficiente para desestabilizar o leito. Para os caudais de 1,47 l/s e superiores verifica-se já a formação de fossas, que embora apresentem dimensões inferiores às da brita 5/15, não poderão ser desprezadas.

Verificou-se, igualmente, que a construção do canal a jusante do descarregador, conduziu, para certos valores de caudais, a velocidades de escoamento, mesmo em zonas sem turbulência aparente, que originaram, no caso do material areia e para caudais superiores a 1.35 l/s o transporte do material do leito para jusante do canal, facto que ocorreria mesmo no caso de não existir formação de ressalto

hidráulico. Nos restantes caudais, as velocidades atingidas, sendo superiores, provocaram o arrastamento do material, ou sendo de pequena grandeza conduziam à sua deposição em secções mais a jusante como se pode verificar pelo traçado ds perfis das fossas de erosão anteriormente apresentados.

No caso dos materiais designados como britas para além de não se verificar arrastamento, constata-se a deposição do material resultante da erosão, quer a montante do início do ressalto quer em secções mais a jusante, denotando que após o levantamento do material o seu arrastamento é contrariado pelo peso e dimensões deste, sendo os efeitos da turbulência do escoamento, em princípio, os responsáveis pelo referido levantamento.

4.4.2 ANÁLISE DAS FOSSAS DE EROÇÃO CONSIDERANDO A ACÇÃO DE DESCARGA POR JACTO

Na tentativa de caracterizar correctamente o mecanismo de formação de fossas na instalação experimental, foram calculadas as profundidades teóricas para as fossas de erosão de acordo com expressões genéricas propostas por diversos autores. Este conjunto de expressões, apresentadas no capítulo 2, no quadro (2.1), dependem, tal como foi referido, apenas do caudal específico, q , descarregado, da carga hidráulica, H , na secção de saída do jacto e da granulometria do material do leito, traduzida por um diâmetro característico, d_{90} ou d_m e permitem obter a a distancia, D , do ponto mais profundo da fossa criada, até à superfície livre.

Nos quadros (4.23.) a (4.24.) apresentam-se os resultados obtidos para os três tipos de material do leito, tendo-se considerado valores de d_{90} e d_m expostos no quadro (3.1).

Os valores de H obtem-se pela adição dos valores de H_0 e H_1 apresentados nos quadro (4.15.) e (4.16.), tendo-se considerado quea profundidade da água no ponto de impacto seria a altura $D1$.

Quadro 4.23. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito em areia

Q [l/s]	q [m ² /s]	H [m]	D [m]							D _{max} [m]
			Eggenberger	Franke	Hartung	Machado	Patrashev	Schoktlich	Veronese	
0.51	0.010	0.09	0.34	0.36	0.23	0.10	0.18	0.17	0.14	0.042
0.71	0.014	0.09	0.41	0.44	0.28	0.11	0.21	0.21	0.16	0.054
0.85	0.017	0.11	0.49	0.54	0.34	0.13	0.24	0.24	0.19	0.059
0.99	0.020	0.12	0.58	0.65	0.39	0.15	0.27	0.27	0.21	0.067
1.17	0.024	0.15	0.71	0.80	0.47	0.17	0.31	0.31	0.24	0.071
1.35	0.027	0.16	0.80	0.91	0.53	0.19	0.34	0.34	0.26	0.079
1.47	0.029	0.15	0.80	0.91	0.54	0.19	0.35	0.35	0.27	0.079
1.65	0.033	0.18	0.94	1.08	0.62	0.21	0.38	0.38	0.29	0.088
1.89	0.038	0.18	1.04	1.21	0.68	0.23	0.42	0.42	0.32	0.098
2	0.040	0.20	1.11	1.29	0.72	0.24	0.43	0.44	0.33	0.106

Quadro 4.24. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito em brita 5/15

Q [l/s]	q [m ² /s]	H [m]	D [m]							D _{max} [m]
			Eggenberger	Franke	Hartung	Machado	Patrashev	Schoktlich	Veronese	
0.51	0.010	0.09	0.15	0.13	0.12	0.08	0.11	0.09	0.08	0.019
0.71	0.014	0.09	0.18	0.16	0.15	0.10	0.13	0.11	0.09	0.026
0.85	0.017	0.11	0.22	0.19	0.17	0.11	0.15	0.12	0.10	0.030
0.99	0.020	0.12	0.25	0.23	0.20	0.13	0.16	0.14	0.12	0.033
1.17	0.024	0.15	0.31	0.28	0.24	0.15	0.19	0.16	0.13	0.040
1.35	0.027	0.16	0.35	0.32	0.27	0.16	0.20	0.17	0.14	0.041
1.47	0.029	0.15	0.35	0.32	0.28	0.17	0.21	0.18	0.15	0.043
1.65	0.033	0.18	0.41	0.38	0.32	0.19	0.23	0.20	0.16	0.047
1.89	0.038	0.18	0.45	0.43	0.35	0.20	0.25	0.22	0.18	0.053
2.00	0.040	0.20	0.48	0.46	0.37	0.21	0.26	0.23	0.19	0.056

Quadro 4.25. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito em brita 9.5/19

Q [l/s]	q [m ² /s]	H [m]	D [m]							D _{max} [m]
			Eggenberger	Franke	Hartung	Machado	Patrashev	Schoktlich	Veronese	
0.51	0.010	0.09	0.14	0.12	0.11	0.08	0.10	0.08	0.06	0.018
0.71	0.014	0.09	0.17	0.14	0.14	0.10	0.12	0.10	0.07	0.021
0.85	0.017	0.11	0.20	0.18	0.17	0.11	0.14	0.12	0.09	0.024
0.99	0.020	0.12	0.24	0.21	0.19	0.13	0.16	0.13	0.10	0.025
1.17	0.024	0.15	0.29	0.26	0.23	0.15	0.18	0.15	0.11	0.026
1.35	0.027	0.16	0.32	0.29	0.26	0.16	0.19	0.16	0.12	0.028
1.47	0.029	0.15	0.32	0.30	0.26	0.16	0.20	0.17	0.12	0.030
1.65	0.033	0.18	0.38	0.35	0.30	0.18	0.22	0.19	0.14	0.033
1.89	0.038	0.18	0.42	0.39	0.33	0.20	0.24	0.20	0.15	0.044
2.00	0.040	0.20	0.45	0.42	0.35	0.21	0.25	0.21	0.15	0.049

Os valores calculados pelas expressões referidas diferem substancialmente dos valores medidos, nos ensaios, das profundidades das fossas.

Aprofundando um pouco mais a análise dos escoamentos e com vista a apreciar a influência tanto do tipo de material utilizado como do ângulo de saída, recorreu-se à expressão (2.5.), de natureza diferente. Apresentam-se de seguida os valores obtidos pela aplicação da fórmula referida, para as diferentes situações de fundo móvel e para as várias condições de escoamento.

Quadro 4.26. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito de areia segundo Martins

Q [l/s]	D_{teórico} [m]	D_{max} [m]
0.51	0.045	0.042
0.71	0.053	0.054
0.85	0.059	0.059
0.99	0.064	0.067
1.17	0.069	0.071
1.35	0.073	0.079
1.47	0.075	0.079
1.65	0.080	0.088
1.89	0.086	0.098
2.00	0.089	0.106

Quadro 4.27. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito de brita 5/15 segundo Martins

Q [l/s]	D_{teórico} [m]	D_{max} [m]
0.51	0.035	0.019
0.71	0.042	0.026
0.85	0.046	0.030
0.99	0.051	0.033
1.17	0.054	0.040
1.35	0.056	0.041
1.47	0.058	0.043
1.65	0.062	0.047
1.89	0.067	0.053
2.00	0.069	0.056

Quadro 4.28. – Profundidades máximas teóricas para as fossas de erosão para o leito de brita 9.5/19 segundo Martins

Q [l/s]	D _{teórico} [m]	D _{max} [m]
0.51	0.034	0.018
0.71	0.041	0.021
0.85	0.045	0.024
0.99	0.050	0.025
1.17	0.053	0.026
1.35	0.055	0.028
1.47	0.057	0.030
1.65	0.060	0.033
1.89	0.066	0.044
2.00	0.068	0.049

Como foi referido nas expressões acima foi considerada como profundidade altura do colchão de água na zona de impacto do jacto a altura conjugada, $D1$, do ressalto hidráulico opção que poderá ser discutível, dado que os pontos de profundidade máxima das fossas se situam em secções do canal a jusante daquela secção. No quadro (4.29). apresentam-se essas localizações, para cada material, através da distância entre o início do canal e o ponto de profundidade máxima da fossa.

Quadro 4.29. – Localização da secção de profundidade máxima da fossa de erosão

Q [l/s]	L z _{max} (areia) [m]	L z _{max} (brita 5/15) [m]	L z _{max} (brita 9.5/19) [m]
0.51	0.10	0.06	0.02
0.71	0.12	0.07	0.06
0.85	0.16	0.08	0.06
0.99	0.18	0.08	0.06
1.17	0.19	0.12	0.07
1.35	0.20	0.13	0.07
1.47	0.20	0.14	0.12
1.65	0.22	0.16	0.13
1.89	0.24	0.16	0.14
2.00	0.23	0.17	0.14

Analisando estes valores, pode-se observar que o ponto de profundidade máxima da fossa de erosão se situa a diferentes distâncias do início do canal para cada material usado no leito, ao invés do ponto de impacto do jacto com o colchão de água a jusante que, em função dos ângulos reduzidos de saída, variam pouco em toda a gama de caudais.

Poder-se-á fazer uma análise da trajectória dos jactos, que, embora não entrando em conta com fenómenos de atrito e turbulência com o colchão de água a jusante, pode permitir estabelecer o ponto de impacto do jacto no fundo do leito. O processo consiste em definir a trajectória do jacto em profundidade, de modo a verificar se o ponto de impacto no fundo coincide com o local de profundidade máxima da fossa de erosão. Atendendo à expressão (2.1.) foi possível determinar as trajectórias dos jactos, e compará-las com os perfis das fossas de erosão.

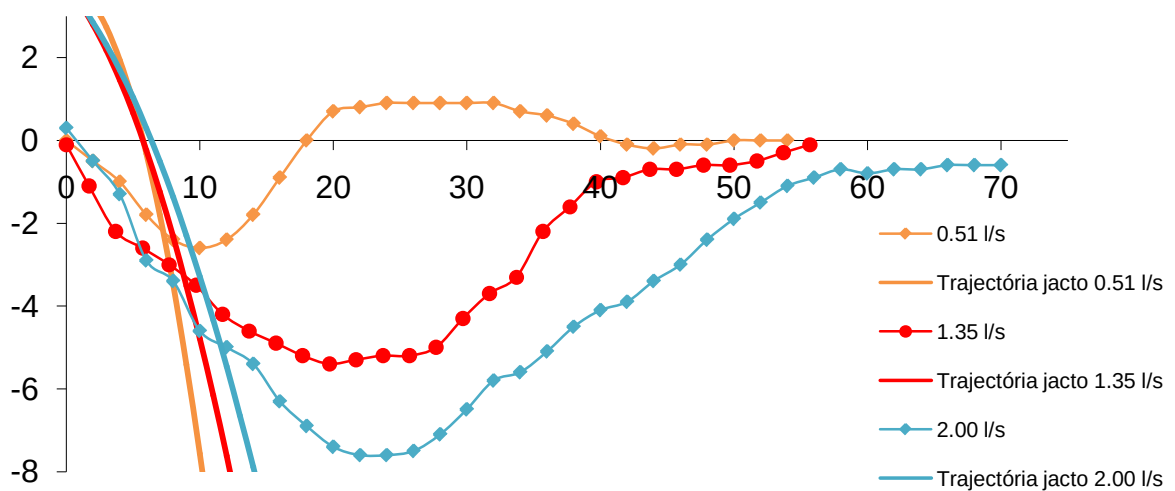


Fig. 4.16. – Perfis das fossas de erosão relativas ao leito composto por areia face à trajectória do jacto de saída

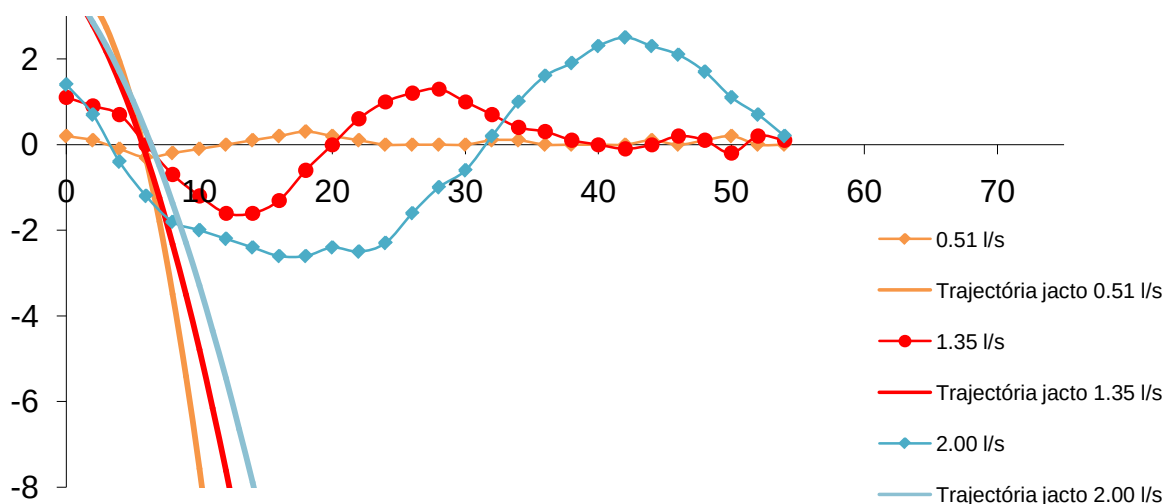


Fig. 4.17. – Perfis das fossas de erosão relativas ao leito composto por brita 5/15 face à trajectória do jacto de saída

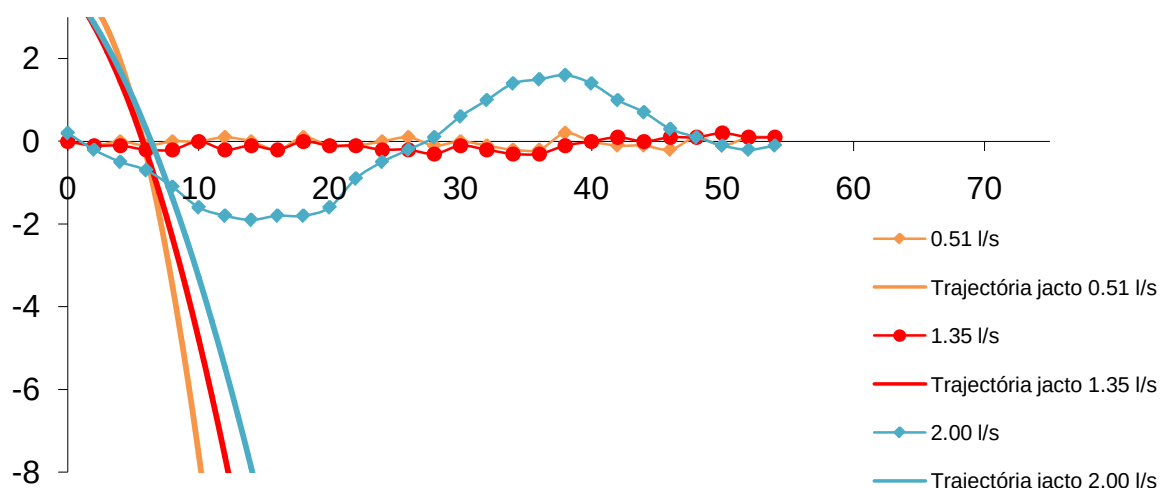


Fig. 4.18. – Perfis das fossas de erosão relativas ao leito composto por brita 9.5/19 face à trajetória do jacto de saída

Observando o gráfico, pode-se verificar que a trajetória teórica do jacto de saída intersecta os perfis de erosão sensivelmente na zona de maior profundidade da fossa de erosão, apenas para o caudal de 0.51 l/s. Para os restantes caudais, a trajetória do jacto intersecta o perfil da fossa de erosão numa secção a montante do ponto de profundidade máxima da fossa de erosão. No entanto pode observar-se que as secções onde o jacto intersecta o perfil do leito erodido são secções de forte declive, indicando uma possível influência do jacto. Refere-se novamente que a expressão (2.1) apenas traduz o movimento do jacto através do ar, não tendo em conta o que acontece após o jacto colidir com o colchão de água. Deve também ser referido que a expressão (2.1.) traduz a trajetória teórica de um jacto, na sua secção média, não sendo assim considerada a dispersão do jacto.

De acordo com os resultados obtidos, pode concluir-se que embora se verifique a presença de um jacto à saída do descarregador, que influenciará o início do ressalto hidráulico, não parecem ser aplicáveis as mesmas metodologias de cálculo que para um salto de esqui. Embora o jacto de saída possa ter alguma influência na formação de fossas de erosão, a diferença entre os dados registados experimentalmente e as previsões teóricas sugerem que, de facto, o fenómeno de maior importância no presente caso é o ressalto hidráulico.

4.3.3. ANÁLISE DAS FOSSAS DE EROSÃO CONSIDERANDO A ACÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Após levantamento dos perfis de erosão, conforme descrito, foi feita uma análise comparativa com as metodologias propostas na literatura. A referência de maior interesse para o caso em estudo foi a exposta por Pagliara et al (2007). Embora o referido estudo tenha sido efectuado num modelo de características apreciavelmente diferentes do modelo utilizado no presente trabalho, foi seguida a mesma metodologia de modo a poder ser feita uma comparação e análise crítica dos resultados. Assim irá procurar encontrar-se uma função que relacione a profundidade máxima da fossa, designada por z_{max} com o número de Froude da partícula, F_{d90} calculado de acordo com a expressão (2.7). De entre as considerações adoptadas destaca-se o facto de ter sido utilizado como altura de escoamento a montante, h_1 o parâmetro $D1$ e a altura a jusante, h_0 , o parâmetro $D2$. Como inclinação, S_0 , foi utilizada a inclinação do descarregador, admitindo tratar-se de um descarregador simples com soleira rugosa.

O referido método tem, como já foi referido, a particularidade de estar intimamente ligado com as características do material do leito do curso de água, traduzidas através do número de Froude da partícula. No quadro seguinte apresentam-se os parâmetros característicos para cada material.

Quadro 4.30. – Profundidades máximas teóricas das fossas de erosão

Q[l/s]	F _{d90}			z _{max} [cm]		
	Areia	Brita 5/15	Brita 9.5/19	Areia	Brita 5/15	Brita 9.5/19
0.51	5.216	1.294	1.202	2.60	0.30	0.20
0.71	5.948	1.476	1.371	3.50	0.70	0.20
0.85	6.424	1.594	1.481	3.80	0.90	0.30
0.99	6.842	1.698	1.577	4.40	1.00	0.20
1.17	7.768	1.927	1.790	4.70	1.60	0.20
1.35	8.680	2.153	2.000	5.40	1.60	0.30
1.47	9.178	2.277	2.115	5.40	1.80	0.50
1.65	9.864	2.447	2.273	6.20	2.10	0.70
1.89	10.337	2.565	2.382	6.90	2.40	1.50
2.00	10.521	2.610	2.425	7.60	2.60	1.90

Os valores acima calculados permitiram a representação gráfica da figura (4.19).

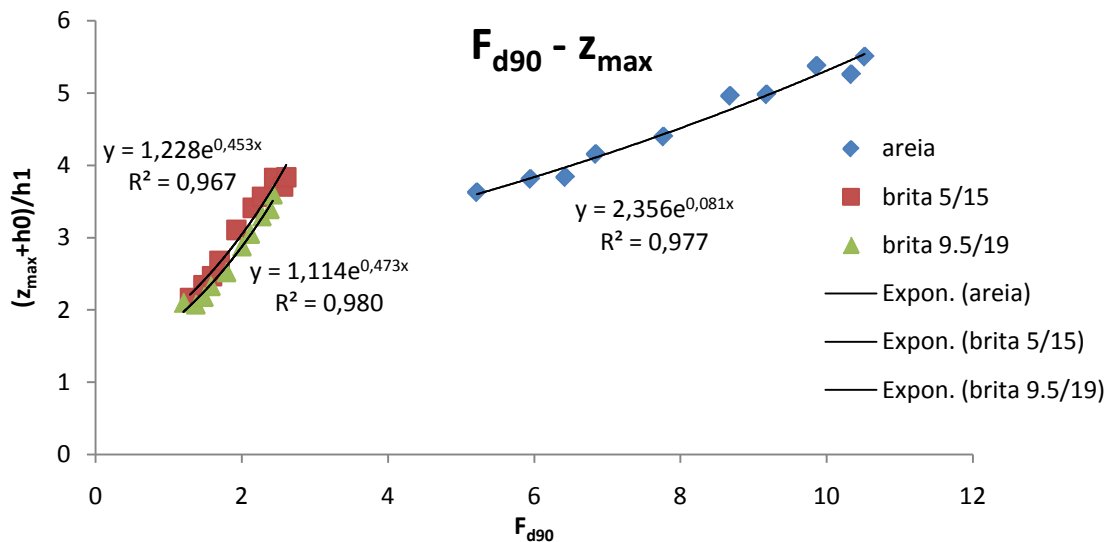


Fig. 4.19. – Relação entre F_{d90} e z_{max} para os três materiais

Por extrapolação dos valores representados chegou-se a uma expressão semelhante à proposta por Pagliara et al (2007), sendo notável o coeficiente de correlação apresentado pelas funções. Pela análise

do gráfico pode observar-se que as duas britas apresentam um comportamento muito semelhante, sendo ainda notória a diferença registada em relação ao comportamento da areia na formação de fossas de erosão.

Areia: $y = 2.356 \cdot e^{0.081 \cdot x}$ (4.1)

Brita 5/15: $y = 1.228 \cdot e^{0.453 \cdot x}$ (4.2)

Brita 9.5/19: $y = 1.114 \cdot e^{0.473 \cdot x}$ (4.3)

Existe uma grande semelhança entre as curvas propostas para as britas, que diferem notoriamente da sugerida para a areia. Os valores do parâmetro F_{d90} são significativamente superiores para a areia em relação às britas. De notar que embora os três materiais apresentem um peso específico muito parecido, no cálculo daquele parâmetro, é preponderante a dimensão característica d_{90} , que difere muito das britas para a areia, representando a grande diferença na granulometria dos materiais.

Dada a semelhança entre as expressões sugeridas para as britas optou-se por considerar as duas britas como um único material, tal como se mostra na figura (4.20.), tendo-se chegado a uma expressão ligeiramente diferente para a relação entre $z_{\max}$ e F_{d90} que a seguir se apresenta:

$$y = 1.147 \cdot e^{0.473 \cdot x} \quad (4.4)$$

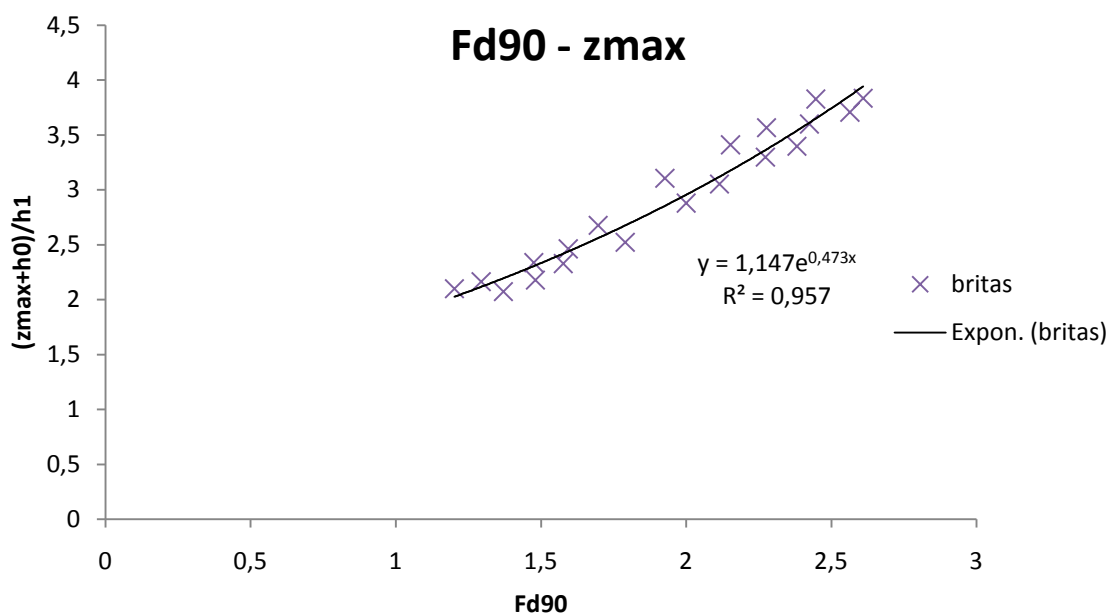


Fig. 4.20. – Relação entre F_{d90} e $z_{\max}$, admitindo as duas britas como um material único

Com o intuito de determinar qual o diâmetro característico para um eventual material aplicável no leito que conduzisse a uma fossa de erosão nula, em cada condição de escoamento, elaborou-se o quadro (4.31). a seguir apresentado.

Quadro 4.31. – Valores característicos de um eventual material que conduzisse a uma fossa de erosão nula

Q [l/s]	h ₀ /h ₁	Fd ₉₀	d ₉₀ [m]
0.51	1.97	1.1477	0.0208
0.71	1.97	1.1441	0.0273
0.85	2.04	1.2162	0.0282
0.99	2.24	1.4185	0.0235
1.17	2.44	1.5959	0.0239
1.35	2.76	1.8559	0.0221
1.47	2.86	1.9308	0.0228
1.65	3.03	2.0570	0.0232
1.89	2.88	1.9468	0.0285
2.00	2.97	2.0092	0.0277

Como pode ser observado no quadro (4.31.) para as condições de escoamento ensaiadas seria necessário um material que apresentasse um parâmetro d₉₀ da ordem de 28.5/30 mm, material esse de dimensões substancialmente superiores às da brita 9.5/19.

4.3.2 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO TAPETE DE PROTECÇÃO DO LEITO DA BACIA DE DISSIPACÃO

Tendo em atenção os resultados experimentais relativos aos comportamentos dos diferentes materiais dos fundos móveis analisados foi averiguada a possibilidade de se aplicar um filtro invertido no canal, tendo-se considerado, como material constituinte do leito do curso de água, a areia, cujas características granulométricas poderiam ser, em protótipo, possíveis de existir na realidade.

Da análise das curvas granulométricas dos três materiais estudados, que são apresentadas em conjunto na figura (4.21.), foram retirados os seguintes valores para os diâmetros característicos d₁₀, d₁₅, d₆₀ e d₈₅.

Quadro 4.32. – Parâmetros característicos dos materiais

	Areia	Brita 5/15	Brita 9,5/19
d ₁₀ [mm]	1.00	4.00	8.00

d15 [mm]	1.00	8.00	8.00
d60 [mm]	2.00	8.00	19.00
d85 [mm]	2.00	16.00	19.00

De acordo com a metodologia exposta no capítulo 2, para o dimensionamento deste tipo de filtros, o diâmetro característico d15 do material para filtro deve ser quatro vezes superior à dimensão d15 do material base do leito. O diâmetro d15 do material para filtro não deve, no entanto, o exceder quatro vezes o valor de d85 do material base. Sendo assim, deve ser verificado que o parâmetro d15 da brita 5/15 seja pelo menos quatro vezes superior ao d15 da areia. Deve também ser verificado que o d15 da brita 5/15 não seja mais de quatro vezes superior ao d85 da areia.

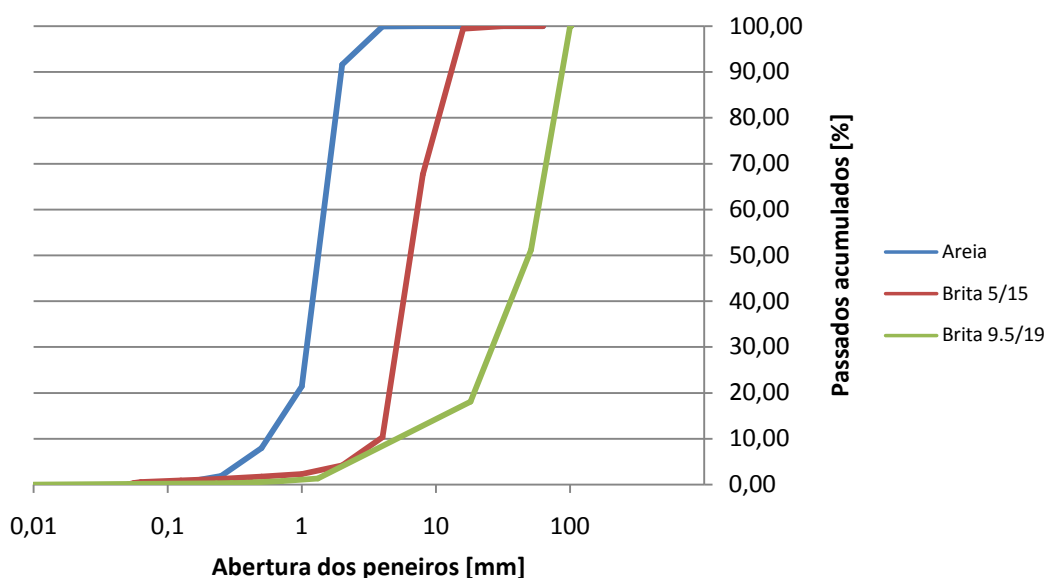


Fig. 4.21. – Curvas granulométricas dos materiais granulares utilizados no fundo móvel

Atendendo ao quadro (4.32), verificou-se a adequação das britas como materiais para um eventual filtro invertido. Como já foi referido, tomou-se como material base do leito a areia. Para proceder à verificação, foram usados como símbolos, para os diâmetros característicos da areia, d , para a brita 5/15, d' , e para a brita 9.5/19, d'' . Desta forma, admitindo qe a primeira camada do filtro, colocado sobre o leito natural de areia é constituído pela brita 5/15, ter-se-á:

$$d'_{15} > 4 \cdot d_{15} \Leftrightarrow 8 > 4 \times 1 \Leftrightarrow 8 > 4 \quad \text{verifica condição}$$

$$d'_{15} < 4 \cdot d_{85} \Leftrightarrow 8 < 4 \times 2 \Leftrightarrow 8 < 8 \quad \text{verifica condição}$$

$$d'_{60} < 2 \cdot d'_{10} \Leftrightarrow 8 < 2 \times 4 \Leftrightarrow 8 < 8 \quad \text{verifica condição}$$

A brita 5/15 aparenta assim apresentar condições favoráveis à sua utilização como camada de protecção da areia. Fazendo uma verificação análoga para a brita 9.5/19, passando a considerar a brita 5/15 como material base ter-se-á:

$$d''_{15} > 4 \cdot d'_{15} \Leftrightarrow 8 > 4 \times 8 \Leftrightarrow 8 > 32 \quad \text{não verifica}$$

Este material não seria adequado para a aplicação num filtro invertido nas condições supostas, isto é, como segunda camada de protecção do material do leito, dado não satisfazer as condições anteriormente referidas, tendo-se, no entanto verificado que, no que respeita ao seu comportamento como fundo móvel, apenas se registaram erosão para caudais de maior valor e que ocorria a deposição do material erodido quase imediatamente a jusante. Tendo em conta o acima referido e que as dimensões requeridas, para a segunda camada, relativamente ao diâmetro correspondente a d15 são já da ordem das que, de acordo com a previsão feita, com base na expressão (expressão 2 britas), conduziriam à não existência de fossa de erosão causada pelo ressalto hidráulico, considerou-se que a primeira camada de brita 5/15, poderia ser estabilizada com uma camada de enrocamento, que no modelo teria a dimensão de 30mm, que corresponderia, no protótipo, a 1.20m.

De modo a verificar a segurança da camada de protecção proposta relativamente ao arrastamento de material, foram usados critérios que permitiram definir a velocidade crítica para o escoamento.

Apresentam-se no quadro (4.33.) os valores das velocidades de escoamento nas secções de montante e de jusante do ressalto, no modelo e no protótipo, para análise de riscos de arrastamento.

Quadro 4.33. – Velocidades de escoamento nas secções imediatamente a montante e a jusante do ressalto hidráulico, em modelo e em protótipo

Q [l/s]	Modelo		Protótipo	
	U ₁ [m/s]	U ₂ [m/s]	U ₁ [m/s]	U ₂ [m/s]
0.51	0.66	0.33	4.16	2.11
0.71	0.75	0.38	4.75	2.41
0.85	0.81	0.40	5.13	2.52
0.99	0.86	0.39	5.46	2.44
1.17	0.98	0.40	6.20	2.54
1.35	1.10	0.40	6.93	2.51
1.47	1.16	0.41	7.33	2.56
1.65	1.25	0.41	7.88	2.60
1.89	1.31	0.45	8.25	2.87
2.00	1.33	0.45	8.40	2.83

A comparação dos valores acima indicados, com os obtidos a partir dos critérios apresentados no ábaco proposto por Hjülstrom, figura (2.18) referido no capítulo 2, conduz, para um diâmetro d50 de 30 mm no modelo, correspondente a 1.20m no protótipo, a uma velocidade crítica de arrastamento de

0.47m/s no modelo e 3m/s no protótipo, concluindo-se que, na secção de montante, poderá haver sempre o risco de arrastamento, havendo seguidamente deposição eventual de material. Na secção de jusante, verifica-se sempre uma velocidade de escoamento inferior a 3 m/s.

Utilizando o critério de Neill, por aplicação da expressão (2.19), que satisfaz a semelhança de Froude, compararam-se os valores das velocidades no modelo e das velocidades críticas para as situações de escoamento ensaiadas e apresentam-se no quadro (4.34), permitindo concluir que, para caudais até 1.17 l/s, as velocidades de escoamento são sempre inferiores à velocidade crítica de arrastamento. Para caudais de 1.35 l/s e superiores, as velocidades de escoamento na secção de montante do ressalto hidráulico, são ligeiramente superiores às velocidades críticas de arrastamento, indicando a possibilidade de arrastamento do material para jusante.

Quadro 4.34. – Comparação entre a velocidade crítica de arrastamento e a maior velocidade verificada no escoamento

Q [l/s]	U_{cr} [m/s]	U_1 [m/s]	U_2 [m/s]
0.51	1.02	0.66	0.33
0.71	1.04	0.75	0.38
0.85	1.05	0.81	0.40
0.99	1.06	0.86	0.39
1.17	1.06	0.98	0.40
1.35	1.07	1.10	0.40
1.47	1.07	1.16	0.41
1.65	1.07	1.25	0.41
1.89	1.08	1.31	0.45
2.00	1.09	1.33	0.45

Da aplicação dos critérios de velocidade referidos poderá concluir-se que, eventualmente, poderá haver, na secção de montante da bacia, necessidade de reforço da dimensão do enrocamento de protecção, o que já se não verifica na restante parte da bacia. Uma análise do diâmetro do enrocamento necessário na zona de montante da bacia seria, para o máximo caudal descarregado, de 5cm no modelo e 2 m no protótipo. Deve no entanto fazer-se notar que, em efeito, na secção de início do ressalto existe uma velocidade elevada, que diminui nas secções imediatamente a jusante nas quais ocorre, pelo contrário, um enorme aumento de turbulência, cujo efeito se torna preponderante no escoamento e a que a solução proposta para protecção da bacia parece responder.

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nos trabalhos apresentados nesta dissertação procedeu-se ao estudo experimental da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de um descarregador não convencional, de degraus.

Foi utilizado um modelo de descarregador já existente no Laboratório de Hidráulica da Faculdade da Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos da Engenharia da Universidade do Porto, a jusante do qual foram criadas as condições para a ocorrência de uma dissipação de energia por ressalto hidráulico. Na bacia de dissipação preparada para o efeito, foram realizados ensaios em fundo fixo e fundo móvel para uma gama de caudais variando entre 0.5 l/s e 2 l/s.

Nos ensaios em fundo fixo foram definidas as características dos ressaltos hidráulicos formados para a gama de caudais acima citada, podendo referir-se que:

- Os números de Froude calculados, para as diferentes condições de escoamento situam-se entre 1.67 e 2.45, o que segundo a classificação proposta por Peterka (1978), indica a ocorrência de ressaltos fracos, com valores da perda de energia baixos. De facto verificou-se, através do cálculo das energias específicas dos escoamentos nas secções de montante e jusante do ressalto, que a referida perda variou, no modelo, de 0.1cm até 2.1cm de coluna de água, correspondendo a 2.96% e 17.4 % da energia residual a jusante do ressalto, respectivamente para caudais de 0.5 l/s até 2 l/s. Os valores calculados foram comparados com os obtidos através de ábacos e expressões sugeridas por diferentes autores e verificou-se uma semelhança com os métodos propostos por Bakhmeteff-Matzke, Chow e Silvester, resultando os valores propostos por este último autor em valores exactamente iguais aos medidos.
- Os comprimentos do ressalto hidráulico estimados visualmente situam-se entre os 9.59 e os 44.30 cm. Comparando com os resultados obtidos a partir de expressões existentes na literatura, verificou-se que estas, na generalidade, conduziram a comprimentos maiores para o ressalto hidráulico. Isto pode dever-se à disparidade entre autores sobre o que constitui a secção de jusante do ressalto hidráulico. Estabelecendo uma relação entre o comprimento do ressalto, L_j , e o número de Froude, observou-se que todas as fórmulas propostas na literatura apresentavam uma relação semelhante, tendo em termos de grandeza, as fórmulas sugeridas por Elevatorski e Silvester sido as que se adaptaram melhor aos valores experimentais medidos. Deve ser referido que na medição destes valores houve uma dificuldade em definir com precisão a localização do fim do ressalto hidráulico.

- Foram aplicadas as conclusões dos trabalhos de Simões e Porto para avaliação do comprimento do ressalto hidráulico, tendo como referência o trabalho de Antunes, para definição dos valores dos factores de resistência no escoamento no descarregador de degraus. Os comprimentos teóricos dos ressaltos hidráulicos obtidos pela expressão de Simões e Porto, considerando os referidos coeficientes, foram superiores aos comprimentos medidos. Deve ser referido que este último estudo foi baseado em registos experimentais realizados num modelo de descarregador com uma inclinação bastante superior à do descarregador considerado no presente trabalho.
- As alturas conjugadas foram medidas na secção de início, D1 e na secção considerada como secção final do ressalto hidráulico, D2. Comparando os valores D2 medidos com os valores teóricos obtidos através da expressão de Bélanger, observou-se uma semelhança notável.

Nos ensaios em fundo móvel, na bacia de dissipação, foram considerados três tipos de material do leito que permitiram definir os perfis para as fossas de erosão, originados pelos diferentes tipos de escoamento. Os materiais do leito estudados foram designados por areia, material que se considerou como sendo um material provável do leito do curso de água natural, tendo em conta a semelhança de Froude, e duas britas, designadas pelas suas dimensões, 5/15 e 9.5/19, cujo comportamento se pretendia analisar com vista à sua utilização como materiais de protecção do leito natural, podendo referir-se que:

- As fossas de erosão, originadas pelas diferentes condições de escoamento, assumiram dimensões consideráveis para o fundo em areia, sendo consideravelmente menores para a brita 5/15 e ainda menores para a brita 9.5/19. No caso da areia verificou-se que a partir do caudal de 0.99 l/s deixou de se formar um depósito de materiais a jusante da fossa de erosão, sendo o material transportado para jusante. A partir do caudal de 1.65 l/s verificou-se até que o leito do rio a jusante da fossa de erosão se mantinha constantemente abaixo da cota inicial, nunca voltando a este valor, o que significava o seu arrastamento devido à velocidade do escoamento. As profundidades máxima e mínima verificadas para o material areia foram respectivamente de 2.6cm e 7.6cm, para os caudais mínimo e máximo. Para o fundo móvel em brita 5/15, as fossas de erosão assumiram profundidades menos significativas. Para o caudal de 0.51 l/s a profundidade máxima foi de 3mm, e rondou os 2.4 cm para o caudal de 2 l/s. Com este material não se verificou transporte apreciável de material para jusante. No caso da brita 9.5/19 para caudais inferiores a 1.65 l/s não se verificou qualquer fossa de erosão. Para o caudal máximo considerado, a fossa de erosão atingiu uma profundidade de 2 cm. Também para este material não houve transporte para jusante que possa merecer especial referência.
- O comprimento das fossas de erosão foi igualmente medido. Comparando estes valores com os comprimentos registados para o ressalto hidráulico, verificou-se que o comprimento das fossas, sem ter em conta a extensão de leito arrastado pela acção da velocidade dos escoamentos, era superior ao comprimento do ressalto hidráulico, para todos os caudais, no fundo constituído por areia. Embora o efeito do ressalto hidráulico, traduzido pelas fossas de erosão criadas, dependa do tipo de material do leito, conclui-se no entanto que, neste caso, para todos os valores de caudais esse efeito se prolongou para lá do estimado através dos comprimentos do ressalto medidos, dando eventualmente razão a alguns dos autores citados na bibliografia. Uma análise das pressões e respectivas flutuações, no leito da bacia de dissipação, poderiam esclarecer este ponto.

- A análise do comprimento das fossas de erosão relativas aos restantes materiais do leito permitiu concluir que, nos ensaios com brita 5/15, os comprimentos registados no ressalto hidráulico e na fossa de erosão assumiram valores semelhantes para os caudais de 0.51 e 0.71 l/s, sendo os comprimentos das fossas de erosão sempre inferiores aos comprimentos do ressalto hidráulico para caudais de valores superiores e que, utilizando a brita 9.5/19 como material constituinte do leito, os comprimentos da fossa de erosão eram inferiores aos comprimentos medidos em cada ressalto hidráulico, para toda a gama de caudais.

A análise das fossas de erosão foi completada, tendo-se em conta que as condições de escoamento na secção de jusante do descarregador para além de influenciarem a localização da secção de montante do ressalto poderiam ter influência também na forma dessas mesmas fossas, pelo que foram analisadas as trajectórias dos escoamentos provenientes do último degrau do descarregador que, devido às suas características, foram consideradas como sendo um jacto, que dependia do tipo de escoamento relativo a cada valor de caudal escoado, podendo referir-se o seguinte:

- Tendo como referência o estudo levado a cabo por Antunes (2011) verificou-se que para o caudal de 0.51 l/s o regime de escoamento se processava por quedas sucessivas, enquanto que para os restantes caudais o escoamento foi considerado como deslizante sobre turbilhões. Desta forma foi adoptada a metodologia relativa a descarregadores em salto de esquí, estudada por Figueiredo (2010) sendo tomado como inclinação do trampolim 0 graus para o caudal de 0.51 l/s e -21.04 graus para os restantes.
- Foi feita uma análise da trajectória teórica do jacto de saída, estendendo-a até à profundidade máxima das fossas de erosão, tendo-se concluído que no fundo móvel constituído por areia, o ponto de impacto do jacto com o fundo da fossa ocorria substancialmente a montante da secção onde a profundidade da fossa era maior, intersectando o perfil, no entanto, na secção onde a profundidade das fossas era de sensivelmente dois terços da profundidade máxima sugerindo assim alguma influência na sua formação. De notar que nesta análise não foi tida em conta a influência do colchão de água, na secção correspondente ao ponto de impacto da trajectória do jacto com o curso de água a jusante do descarregador, uma vez que durante o processo de formação das fossas de erosão, a altura do colchão de água foi crescendo gradualmente, sendo diferente do valor da altura conjugada do ressalto D1, considerada como espessura no ponto de impacto do jacto.

A definição das trajectórias dos jactos e a sua comparação com os perfis longitudinais das fossas de erosão sugeriram a hipótese que a descarga, na secção de jusante do descarregador, assimilável de certa forma a um jacto, poderia ter uma influência nas erosões verificadas. Recorrendo novamente à revisão bibliográfica feita, relativa a este assunto e considerando apenas expressões de previsão de profundidades de fossas, originadas por descargas por jactos, em que, para além de outras grandezas, intervínham as propriedades do material constituinte do leito, pode referir-se o seguinte:

- Todas as expressões aplicadas resultaram em valores teóricos superiores aos valores medidos, com excepção da fórmula proposta por Martins cuja utilização resultou em valores de ordem de grandeza comparável com as profundidades máximas medidas.
- A comparação de resultados mostrou que os valores teóricos obtidos eram apreciavelmente superiores aos valores medidos no laboratório, pelo que a hipótese de considerar as fossas de

erosão devidas à acção de uma descarga por meio de jacto foi considerada como não correcta, verificando-se efectivamente que o jacto não seria o factor de maior preponderância na origem de erosões no leito.

Tendo em atenção os resultados precedentes, foram analisadas as características das fossas de erosão como sendo resultantes da ocorrência do ressalto hidráulico. Através da metodologia proposta por Pagliara, foram calculadas as profundidades teóricas máximas das fossas de erosão para os três materiais estudados adaptando essa metodologia às características do descarregador utilizado nos ensaios, podendo referir-se o seguinte:

- Embora o método proposto tenha sido resultante de ensaios realizados num modelo de características fundamentalmente diferentes das verificadas no modelo utilizado no presente trabalho, os valores obtidos através da sua aplicação, considerando a inclinação e os coeficientes de resistência do descarregador em estudo, foram semelhantes aos valores medidos.
- As relações estabelecidas entre as características do material do leito traduzidas pelo chamado número de Froude das partículas desse leito e os valores da profundidade máxima das fossas de erosão registadas, mostraram dois comportamentos diferentes, um para o material areia e outro para os materiais designados como britas, permitindo estabelecer duas expressões diferentes caracterizadoras desses dois comportamentos, função do valor do número de Froude referido;
- Foi utilizada a expressão proposta pelo autor, para materiais caracterizados por números de Froude mais baixos, as britas, para estimar as dimensões dum eventual material que conduzisse a uma fossa de erosão nula, chegando-se à conclusão que para assegurar que não se formassem fossas de erosão para toda a gama de caudais ensaiados, seria necessário um material tal que o seu diâmetro d_{90} fosse de 30mm.

Tendo analisado as características dos ressaltos hidráulicos ocorridos nas diferentes condições de escoamento, denominados como ressaltos fracos, e os comportamentos dos três materiais de leito da bacia de dissipação ensaiados, dos quais o primeiro se supôs ser o material constituinte do leito do curso de água, foi feita uma análise da viabilidade da sua utilização num filtro invertido para protecção do material base, podendo referir-se:

- Aplicando os critérios de dimensionamento de um filtro invertido verificou-se que a brita 5/15 seria adequada como primeira camada de protecção do material do leito, a areia, concluindo-se, no entanto, que a brita 9.5/19 já não poderia, de acordo com aqueles critérios, ser utilizada numa segunda camada, sendo as suas dimensões demasiado reduzidas. A aplicação de tais critérios de dimensionamento do filtro invertido conduziria à obrigatoriedade de utilizar sobre a brita 5/15 um material com um diâmetro d_{15} situado entre os 32 e os 60mm.
- Analisados os comportamentos dos materiais estudados e tendo em conta as dimensões em protótipo dos materiais de protecção foi considerado suficiente para a protecção da camada de brita 5/15, um material com um diâmetro médio de 30 mm, como camada de enrocamento final de protecção.

Para completar o estudo da camada de enrocamento foi feita a verificação da sua segurança relativamente ao arrastamento do material. Foram adoptados os critérios propostos por Neill e Hjulström tendo-se concluído que:

- Utilizando o critério de Neill, foram calculadas as velocidades críticas de arrastamento para um material com as dimensões referidas. Para a secção de montante do ressalto hidráulico, as velocidades de escoamento eram sempre inferiores à velocidade crítica, para caudais até 1.17 l/s, sendo ligeiramente superiores para os restantes. Para a secção de jusante as velocidades de escoamento eram sempre inferiores às velocidades críticas de arrastamento.
- Analisando os resultados face ao critério proposto por Hjulstrom, verificou-se que para o diâmetro do material referido, a velocidade crítica de arrastamento era de 3 m/s no protótipo. As velocidades de escoamento a montante do ressalto hidráulico verificaram-se serem sempre superiores a este valor, sendo as velocidades de escoamento a jusante sempre inferiores, para toda a gama de caudais. Estas conclusões parecem, no entanto, não estar em conformidade com o verificado no laboratório, em que para a brita 9.5/19, de dimensões menores às do material considerado como solução, já praticamente não se verificavam fossas de erosão.

Do ponto de vista da dissipação de energia pode concluir-se que as bacias de dissipação por ressalto hidráulico constituem uma solução eficaz, quando as condições de escoamento no local permitirem a utilização da solução. A implementação dessa solução requer, no entanto um estudo cuidadoso dos efeitos que este fenómeno introduz no leito. De modo a assegurar quer a segurança do aproveitamento hidráulico, quer a estabilidade do leito e margens do curso de água, deve ser averiguado o tipo de protecção a instalar. O estudo feito permite concluir que para certos tipos de ressaltos hidráulicos, como os ressaltos designados como fracos, o filtro invertido pode ser uma solução viável. Os materiais a utilizar devem, no entanto, ser escolhidos cuidadosamente, para que a erosão verificada seja a mínima possível e se encontre dentro de limites dimensionais praticamente exequíveis. Tendo em conta o trabalho desenvolvido, o acima referido e algumas das dificuldades sentidas na análise do problema em estudo, pela necessidade de informação complementar, sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Análise das flutuações de pressão no fundo da bacia de dissipação, de modo a poder estudar de forma mais aprofundada os efeitos devido ao ressalto hidráulico, através do conhecimento dos valores dessas pressões e consequentes forças hidrodinâmicas originadas nos materiais do leito;
- Utilização de materiais de granulometria diferente no fundo móvel, de modo a poder completar o estudo da relação entre a profundidade das fossas de erosão e o número de Froude da partícula, caracterizador do material daquele fundo;
- Construção de um canal da bacia de dissipação de secção divergente, para análise da influência da geometria do canal na dissipação de energia e formação de fossas de erosão no material do leito;
- Construção de um canal de secção constante, mas de largura superior à do descarregador utilizado, para análise da influência deste tipo de solução na dissipação de energia e formação de fossas de erosão no material do leito. Deve ser referido que este eventual estudo só faz sentido uma vez que se pretende o descarregador modelado no Laboratório de Hidráulica da

FEUP faça a descarga lateralmente ao curso de água. Desta forma a sua secção de jusante é inferior à secção do curso de água em que se insere.

BIBLIOGRAFIA

- Antunes, M. J. (2011), *Descarregadores de cheia em canal, em betão, não convencionais*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Azamathulla, H. MD., Aminuddin, A. G. (2011), ANFIS-based approach for predicting the scour depth at culvert outlets. In *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, ASCE, Reston, VA
- Bellin, A., Fiorotto, V. (1995), *Direct dynamic force measurement on slabs in spillway stilling basins*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Reston, VA
- Bhutto, H. B. G. (1987), *Hydraulic jump control and energy dissipation*, Mehran University of Engineering and Technology, Mehran
- Bhutto, H. B. G., Mirani, S. N., Chandio, S. N. (1989), *Characteristics of free hydraulic jump in rectangular channel*, Journal of Engineering and Technology Research, vol. 8, nº 2, Mehran University of Engineering and Technology, Mehran
- Cerezer, S. (2008), *Uso da teoria de valores extremos para estimar valores de pressões hidrodinâmicas em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro: O caso da UHE Porto Colômbia*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Chen, J. Y., Hong, Y. M. (2001), *Characteristics of check dan scour hole by free over-fall flow*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 24: 6, Taylor & Francis, Londres
- Dargahi, B. (2003), *Scour development downstream of a spillway*. Journal of Hydraulic Research, vol. 41, nº 4, Taylor & Francis, Londres
- Falkovich, G., Sreenivasan, K. R. (2006), *Lessons from Hydrodynamic Turbulence*, Physics Today – Abril 2006, American Institute of Physics, Melville, NY
- Farhoudi, J., Smith, K. V. H. (1984), *Local scour profiles downstream of hydraulic jump*, Journal of Hydraulic Research, vol. 23, nº 4, Taylor & Francis, Londres
- Figueiredo, N. (2010), *Dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Hager, W. H., et al (1990), *Classical hydraulic jump: length of roller*. Journal of Hydraulic Research, vol. 28, nº 5, Taylor & Francis, Londres
- <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/06086/hecl4ch11.cfm>. Junho 2011
- Hydraulic Engineering Center (1983), *Hydraulic design of energy dissipators for culverts and channels*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA
- Jain, S. C. (2001), *Open channel flow*, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ
- Maia, R. (2011), *Aproveitamentos Hidráulicos 2: 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
- Mazumder, S. K. (2011), *Energy dissipation devices*, Delhi College of Engineering, Delhi

- Mees, A. (2008), *Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Nalluri, C. (2009) *Civil engineering hydraulics*. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Nikmehr, S., Tabebordbar, A. (2009), *Hydraulic jumps on adverse slope in two cases of rough and smooth bed*, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, ARPN Journals, Ipswich, MA
- Novak, P. (1997). *Hydraulic structures*, Taylor & Francis, Londres
- Novak, P., Guinot, V. (2010), *Hydraulic Modelling – An introduction: Principles, Methods and Applications*, Spon Press, Oxfordshire
- Oliveto, G., Comuniello, V., Onorati, B. (2008), Local scour downstream of stilling basins. In *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Taylor & Francis, Londres
- Pagliara, S., Palermo, M., Carnacina, I. (2010), *Scour and hydraulic jump downstream of block ramps in expanding stilling basins*, Journal of Hydraulic Research, vol. 47, nº 4, Taylor & Francis, Londres
- Peterka, A. J. (1974). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters*, United States Bureau of Reclamation, Denver, CO
- Pinheiro, A. N. (2006), *Obras de dissipação de energia*, Instituto Superior Técnico, Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambientais, Lisboa
- Proença, M. F. (2011), *Aproveitamentos Hidráulicos 1: 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
- Quevedo, D. (2008), *Análise de pressões junto ao fundono ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro através da distribuição bivariada de valores extremos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Teixeira, E. (2003), *Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Thandaveswara, B. S. (2008), *Energy loss in hydraulic jump*, Indian Institute of Technology, Madras
- Varol, F. A., Çevik, E., Yüksel, Y. (2009), *The effect of water jet on the hydraulic jump*, Thirteenth International Water Technology Conference, 2009, pág. 895-910, Hurghada, Egypt
- Wei, C. Y., Lindell, J. E. (2004), Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. In *Hydraulic design handbook*, McGraw-Hill, New York City, NY
- Zahed, E., Farhoudi, J., Javan, M. (2010), *Similarity of scour evolution downstream of stilling basin with an end sill*, 8th IASME/WSEAS International conference on Fluid Mechanics & Aerodynamics (Mastorakis, N., Mladenov, V., Bojkovic, Z., ed.) , Agosto 2010, Taipei, pág. 45-49, WSEAS Press, Hsinchu

ANEXOS

LEVANTAMENTO DE PERFIS DE FOSSAS DE EROSÃO

Material: Areia

Caudal: 0.51 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0
1	2	9.4	0.5
2	4	9.9	1.0
3	6	10.7	1.8
4	8	11.3	2.4
5	10	11.5	2.6
6	12	11.3	2.4
7	14	10.7	1.8
8	16	9.8	0.9
9	18	8.9	0.0
10	20	8.2	-0.7
11	22	8.1	-0.8
12	24	8.0	-0.9
13	26	8.0	-0.9
14	28	8.0	-0.9
15	30	8.0	-0.9
16	32	8.0	-0.9
17	34	8.2	-0.7
18	36	8.3	-0.6
19	38	8.5	-0.4
20	40	8.8	-0.1
21	42	9.0	0.1
22	44	9.1	0.2
23	46	9.0	0.1
24	48	9.0	0.1
25	50	8.9	0.0
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

Material: Areia

Caudal: 0.71 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0
1	2	9.5	0.6
2	4	10.0	1.1
3	6	10.7	1.8
4	8	11.3	2.4
5	10	12.0	3.1
6	12	12.4	3.5
7	14	12.2	3.3
8	16	12.1	3.2
9	18	11.8	2.9
10	20	10.9	2.0
11	22	10.3	1.4
12	24	9.6	0.7
13	26	8.7	-0.2
14	28	8.4	-0.5
15	30	8.2	-0.7
16	32	8.1	-0.8
17	34	8.0	-0.9
18	36	8.0	-0.9
19	38	8.1	-0.8
20	40	8.2	-0.7
21	42	8.3	-0.6
22	44	8.4	-0.5
23	46	8.6	-0.3
24	48	8.7	-0.2
25	50	8.9	0.0
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

Material: Areia

Caudal: 0.85 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0
1	2	9.8	0.9
2	4	10.4	1.5
3	6	10.7	1.8
4	8	11.1	2.2
5	10	12.2	3.3
6	12	12.7	3.8
7	14	12.7	3.8
8	16	12.9	4.0
9	18	12.7	3.8
10	20	12.2	3.3
11	22	11.9	3.0
12	24	11.1	2.2
13	26	10.5	1.6
14	28	9.8	0.9
15	30	9.2	0.3
16	32	8.9	0.0
17	34	8.7	-0.2
18	36	8.6	-0.3
19	38	8.6	-0.3
20	40	8.7	-0.2
21	42	8.6	-0.3
22	44	8.6	-0.3
23	46	8.6	-0.3
24	48	8.7	-0.2
25	50	8.8	-0.1
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

Material: Areia

Caudal: 0.99 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	8.9	0
1	3.5	10.1	1.2
2	5.5	10.5	1.6
3	7.5	11.3	2.4
4	9.5	11.8	2.9
5	11.5	12.6	3.7
6	13.5	13.1	4.2
7	15.5	13.1	4.2
8	17.5	13.3	4.4
9	19.5	13.1	4.2
10	21.5	12.5	3.6
11	23.5	12.1	3.2
12	25.5	10.9	2.0
13	27.5	10.0	1.1
14	29.5	9.5	0.6
15	31.5	9.4	0.5
16	33.5	9.2	0.3
17	35.5	9.2	0.3
18	37.5	9.0	0.1
19	39.5	8.9	0.0
20	41.5	8.9	0.0
21	43.5	8.8	-0.1
22	45.5	8.6	-0.3
23	47.5	8.7	-0.2
24	49.5	8.8	-0.1
25	51.5	8.8	-0.1
26	53.5	8.8	-0.1
27	55.5	8.9	0.0

Material: Areia

Caudal: 1.17 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	8.9	0
1	3.5	10.2	1.3
2	5.5	10.6	1.7
3	7.5	11.5	2.6
4	9.5	11.8	2.9
5	11.5	12.2	3.3
6	13.5	12.9	4.0
7	15.5	13.3	4.4
8	17.5	13.6	4.7
9	19.5	13.6	4.7
10	21.5	13.0	4.1
11	23.5	12.9	4.0
12	25.5	12.7	3.8
13	27.5	12.1	3.2
14	29.5	11.4	2.5
15	31.5	10.9	2.0
16	33.5	10.3	1.4
17	35.5	9.6	0.7
18	37.5	9.3	0.4
19	39.5	8.9	0.0
20	41.5	8.9	0.0
21	43.5	8.6	-0.3
22	45.5	8.7	-0.2
23	47.5	8.8	-0.1
24	49.5	8.8	-0.1
25	51.5	8.9	0.0
26	53.5	8.9	0.0
27	55.5	8.9	0.0

Material: Areia

Caudal: 1.35 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	9.0	0
1	1.7	10.0	1.1
2	3.7	11.1	2.2
3	5.7	11.5	2.6
4	7.7	11.9	3.0
5	9.7	12.4	3.5
6	11.7	13.1	4.2
7	13.7	13.5	4.6
8	15.7	13.8	4.9
9	17.7	14.1	5.2
10	19.7	14.3	5.4
11	21.7	14.2	5.3
12	23.7	14.1	5.2
13	25.7	14.1	5.2
14	27.7	13.9	5.0
15	29.7	13.2	4.3
16	31.7	12.6	3.7
17	33.7	12.2	3.3
18	35.7	11.1	2.2
19	37.7	10.5	1.6
20	39.7	9.9	1.0
21	41.7	9.8	0.9
22	43.7	9.6	0.7
23	45.7	9.6	0.7
24	47.7	9.5	0.6
25	49.7	9.5	0.6
26	51.7	9.4	0.5
27	53.7	9.2	0.3
28	55.7	9.0	0.1

Material: Areia

Caudal: 1.47 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	8.9	0
1	2.0	10.1	1.2
2	4.0	10.7	1.8
3	6.0	11.4	2.5
4	8.0	11.8	2.9
5	10.0	12.3	3.4
6	12.0	12.9	4.0
7	14.0	13.1	4.2
8	16.0	13.4	4.5
9	18.0	14.0	5.1
10	20.0	14.4	5.5
11	22.0	14.3	5.4
12	24.0	14.2	5.3
13	26.0	14.2	5.3
14	28.0	13.8	4.9
15	30.0	13.4	4.5
16	32.0	13.0	4.1
17	34.0	12.8	3.9
18	36.0	11.7	2.8
19	38.0	11.0	2.1
20	40.0	10.6	1.7
21	42.0	10.3	1.4
22	44.0	9.8	0.9
23	46.0	9.6	0.7
24	48.0	9.5	0.6
25	50.0	9.3	0.4
26	52.0	9.2	0.3
27	54.0	9.1	0.2
28	56.0	9.0	0.1
29	58.0	9.0	0.1
30	60.0	8.9	0
31	62.0	8.9	0
32	64.0	8.9	0

33	66.0	8.9	0
34	68.0	8.9	0
35	70.0	8.9	0

Material: Areia

Caudal: 1.65 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	8.7	0
1	2.0	9.4	0.5
2	4.0	10.3	1.4
3	6.0	11.7	2.8
4	8.0	12.4	3.5
5	10.0	12.8	3.9
6	12.0	13.4	4.5
7	14.0	13.7	4.8
8	16.0	14.1	5.2
9	18.0	14.6	5.7
10	20.0	14.9	6.0
11	22.0	15.1	6.2
12	24.0	14.7	5.8
13	26.0	14.2	5.3
14	28.0	14.0	5.1
15	30.0	13.6	4.7
16	32.0	13.5	4.6
17	34.0	13.2	4.3
18	36.0	12.4	3.5
19	38.0	12.1	3.2
20	40.0	11.7	2.8
21	42.0	11.1	2.2
22	44.0	10.7	1.8
23	46.0	10.5	1.6
24	48.0	10.2	1.3
25	50.0	9.7	0.8
26	52.0	9.6	0.7
27	54.0	9.6	0.7
28	56.0	9.5	0.6
29	58.0	9.3	0.4
30	60.0	9.2	0.3
31	62.0	9.2	0.3

32	64.0	9.2	0.3
33	66.0	9.2	0.3
34	68.0	9.2	0.3
35	70.0	9.2	0.3

Material: Areia

Caudal: 1.89 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	8.6	0
1	2.0	9.3	0.4
2	4.0	10.4	1.5
3	6.0	11.1	2.2
4	8.0	12.3	3.4
5	10.0	12.7	3.8
6	12.0	13.6	4.7
7	14.0	14.0	5.1
8	16.0	14.4	5.5
9	18.0	15.0	6.1
10	20.0	15.5	6.6
11	22.0	15.7	6.8
12	24.0	15.8	6.9
13	26.0	15.5	6.6
14	28.0	15.2	6.3
15	30.0	14.6	5.7
16	32.0	14.4	5.5
17	34.0	14.1	5.2
18	36.0	13.8	4.9
19	38.0	13.3	4.4
20	40.0	12.9	4.0
21	42.0	12.6	3.7
22	44.0	12.4	3.5
23	46.0	11.7	2.8
24	48.0	11.1	2.2
25	50.0	10.5	1.6
26	52.0	10.1	1.2
27	54.0	10.0	1.1
28	56.0	9.9	1.0
29	58.0	9.9	1.0
30	60.0	9.6	0.7

31	62.0	9.4	0.5
32	64.0	9.3	0.4
33	66.0	9.3	0.4
34	68.0	9.3	0.4
35	70.0	9.3	0.4

Material: Areia

Caudal: 2.00 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0.0	8.6	0
1	2.0	9.4	0.5
2	4.0	10.2	1.3
3	6.0	11.8	2.9
4	8.0	12.3	3.4
5	10.0	13.5	4.6
6	12.0	13.9	5.0
7	14.0	14.3	5.4
8	16.0	15.2	6.3
9	18.0	15.8	6.9
10	20.0	16.3	7.4
11	22.0	16.5	7.6
12	24.0	16.5	7.6
13	26.0	16.4	7.5
14	28.0	16.0	7.1
15	30.0	15.4	6.5
16	32.0	14.7	5.8
17	34.0	14.5	5.6
18	36.0	14.0	5.1
19	38.0	13.4	4.5
20	40.0	13.0	4.1
21	42.0	12.8	3.9
22	44.0	12.3	3.4
23	46.0	11.9	3.0
24	48.0	11.3	2.4
25	50.0	10.8	1.9
26	52.0	10.4	1.5
27	54.0	10.0	1.1
28	56.0	9.8	0.9
29	58.0	9.6	0.7

30	60.0	9.7	0.8
31	62.0	9.6	0.7
32	64.0	9.6	0.7
33	66.0	9.5	0.6
34	68.0	9.5	0.6
35	70.0	9.5	0.6

Material: Brita 5/15

Caudal: 0.51 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.7	-0.2
1	2	8.8	-0.1
2	4	9.0	0.1
3	6	9.2	0.3
4	8	9.1	0.2
5	10	9.0	0.1
6	12	8.9	0.0
7	14	8.8	-0.1
8	16	8.7	-0.2
9	18	8.6	-0.3
10	20	8.7	-0.2
11	22	8.8	-0.1
12	24	8.9	0.0
13	26	8.9	0.0
14	28	8.9	0.0
15	30	8.9	0.0
16	32	8.8	-0.1
17	34	8.8	-0.1
18	36	8.9	0.0
19	38	8.9	0.0
20	40	8.9	0.0
21	42	8.9	0.0
22	44	8.8	-0.1
23	46	8.9	0.0
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.7	-0.2
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 5/15

Caudal: 0.71 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.8	-0.1
1	2	9.0	0.1
2	4	9.2	0.3
3	6	9.6	0.7
4	8	9.6	0.7
5	10	9.4	0.5
6	12	9.1	0.2
7	14	8.7	-0.2
8	16	8.5	-0.4
9	18	8.3	-0.6
10	20	8.5	-0.4
11	22	8.7	-0.2
12	24	8.9	0.0
13	26	8.9	0.0
14	28	8.8	-0.1
15	30	8.9	0.0
16	32	9.0	0.1
17	34	9.0	0.1
18	36	8.9	0.0
19	38	8.9	0.0
20	40	8.9	0.0
21	42	8.9	0.0
22	44	8.8	-0.1
23	46	8.9	0.0
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.9	0.0
26	52	9.0	0.1
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 5/15

Caudal: 0.85 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.7	-0.2
1	2	8.9	0.0
2	4	9.1	0.2
3	6	9.6	0.7
4	8	9.8	0.9
5	10	9.5	0.6
6	12	9.2	0.3
7	14	8.8	-0.1
8	16	8.6	-0.3
9	18	8.4	-0.5
10	20	8.5	-0.4
11	22	8.5	-0.4
12	24	8.6	-0.3
13	26	8.9	0.0
14	28	9.2	0.3
15	30	9.0	0.1
16	32	9.0	0.1
17	34	8.8	-0.1
18	36	8.9	0.0
19	38	8.9	0.0
20	40	8.8	-0.1
21	42	8.9	0.0
22	44	9.1	0.2
23	46	8.9	0.0
24	48	8.9	0.0
25	50	8.9	0.0
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 5/15

Caudal: 0.99 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.5	-0.4
1	2	8.6	-0.3
2	4	9.0	0.1
3	6	9.5	0.6
4	8	9.9	1.0
5	10	9.8	0.9
6	12	9.5	0.6
7	14	9.1	0.2
8	16	8.9	0.0
9	18	8.6	-0.3
10	20	8.3	-0.6
11	22	8.4	-0.5
12	24	8.5	-0.4
13	26	8.7	-0.2
14	28	8.7	-0.2
15	30	8.9	0.0
16	32	9.0	0.1
17	34	9.0	0.1
18	36	8.9	0.0
19	38	9.0	0.1
20	40	8.8	-0.1
21	42	8.9	0.0
22	44	8.8	-0.1
23	46	8.7	-0.2
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.8	-0.1
26	52	8.8	-0.1
27	54	8.8	-0.1

Material: Brita 5/15

Caudal: 1.17 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.5	-0.4
1	2	8.6	-0.3
2	4	8.9	0.0
3	6	9.6	0.7
4	8	10.2	1.3
5	10	10.4	1.5
6	12	10.5	1.6
7	14	10.2	1.3
8	16	9.6	0.7
9	18	9.2	0.3
10	20	8.6	-0.3
11	22	8.2	-0.7
12	24	7.9	-1.0
13	26	7.8	-1.1
14	28	8.0	-0.9
15	30	8.2	-0.7
16	32	8.3	-0.6
17	34	8.7	-0.2
18	36	8.6	-0.3
19	38	8.8	-0.1
20	40	8.9	0.0
21	42	8.7	-0.2
22	44	9.0	0.1
23	46	9.1	0.2
24	48	8.9	0.0
25	50	8.7	-0.2
26	52	8.8	-0.1
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 5/15

Caudal: 1.35 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	7.8	-1.1
1	2	8.0	-0.9
2	4	8.2	-0.7
3	6	8.9	0.0
4	8	9.6	0.7
5	10	10.1	1.2
6	12	10.5	1.6
7	14	10.5	1.6
8	16	10.2	1.3
9	18	9.5	0.6
10	20	8.9	0.0
11	22	8.3	-0.6
12	24	7.9	-1.0
13	26	7.7	-1.2
14	28	7.6	-1.3
15	30	7.9	-1.0
16	32	8.2	-0.7
17	34	8.5	-0.4
18	36	8.6	-0.3
19	38	8.8	-0.1
20	40	8.9	0.0
21	42	9.0	0.1
22	44	8.9	0.0
23	46	8.7	-0.2
24	48	8.8	-0.1
25	50	9.1	0.2
26	52	8.7	-0.2
27	54	8.8	-0.1

Material: Brita 5/15

Caudal: 1.47 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	7.6	-1.3
1	2	7.8	-1.1
2	4	8.3	-0.6
3	6	8.7	-0.2
4	8	9.6	0.7
5	10	10.1	1.2
6	12	10.6	1.7
7	14	10.7	1.8
8	16	10.5	1.6
9	18	9.8	0.9
10	20	9.3	0.4
11	22	9.0	0.1
12	24	8.3	-0.6
13	26	7.8	-1.1
14	28	7.5	-1.4
15	30	7.7	-1.2
16	32	7.7	-1.2
17	34	7.9	-1.0
18	36	8.1	-0.8
19	38	8.4	-0.5
20	40	8.6	-0.3
21	42	8.6	-0.3
22	44	8.7	-0.2
23	46	8.6	-0.3
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.7	-0.2
26	52	8.8	-0.1
27	54	8.8	-0.1

Material: Brita 5/15

Caudal: 1.65 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	7.5	-1.4
1	2	7.8	-1.1
2	4	8.7	-0.2
3	6	9.5	0.6
4	8	10.1	1.2
5	10	10.6	1.7
6	12	10.7	1.8
7	14	10.9	2.0
8	16	11.0	2.1
9	18	10.4	1.5
10	20	10.0	1.1
11	22	9.6	0.7
12	24	9.2	0.3
13	26	8.5	-0.4
14	28	7.9	-1.0
15	30	7.2	-1.7
16	32	7.0	-1.9
17	34	6.9	-2.0
18	36	7.0	-1.9
19	38	7.2	-1.7
20	40	7.7	-1.2
21	42	8.1	-0.8
22	44	8.5	-0.4
23	46	8.7	-0.2
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.7	-0.2
26	52	8.6	-0.3
27	54	8.7	-0.2

Material: Brita 5/15

Caudal: 1.89 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	7.8	-1.1
1	2	8.1	-0.8
2	4	9.0	0.1
3	6	9.7	0.8
4	8	9.9	1.0
5	10	10.6	1.7
6	12	11.0	2.1
7	14	11.2	2.3
8	16	11.3	2.4
9	18	11.1	2.2
10	20	11.1	2.2
11	22	10.8	1.9
12	24	10.4	1.5
13	26	10.2	1.3
14	28	9.1	0.2
15	30	8.1	-0.8
16	32	7.4	-1.5
17	34	6.9	-2.0
18	36	6.7	-2.2
19	38	6.8	-2.1
20	40	6.9	-2.0
21	42	7.2	-1.7
22	44	7.1	-1.8
23	46	7.5	-1.4
24	48	7.9	-1.0
25	50	8.5	-0.4
26	52	8.8	-0.1
27	54	9.2	0.3

Material: Brita 5/15

Caudal: 2.00 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	7.5	-1.4
1	2	8.2	-0.7
2	4	9.3	0.4
3	6	10.1	1.2
4	8	10.7	1.8
5	10	10.9	2.0
6	12	11.1	2.2
7	14	11.3	2.4
8	16	11.5	2.6
9	18	11.5	2.6
10	20	11.3	2.4
11	22	11.4	2.5
12	24	11.2	2.3
13	26	10.5	1.6
14	28	9.9	1.0
15	30	9.5	0.6
16	32	8.7	-0.2
17	34	7.9	-1.0
18	36	7.3	-1.6
19	38	7.0	-1.9
20	40	6.6	-2.3
21	42	6.4	-2.5
22	44	6.6	-2.3
23	46	6.8	-2.1
24	48	7.2	-1.7
25	50	7.8	-1.1
26	52	8.2	-0.7
27	54	8.7	-0.2

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 0.51 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	9.0	0.1
2	4	8.9	0.0
3	6	9.0	0.1
4	8	8.9	0.0
5	10	8.9	0.0
6	12	8.8	-0.1
7	14	8.9	0.0
8	16	9.1	0.2
9	18	8.8	-0.1
10	20	9.0	0.1
11	22	9.0	0.1
12	24	8.9	0.0
13	26	8.8	-0.1
14	28	9.0	0.1
15	30	8.9	0.0
16	32	9.0	0.1
17	34	9.1	0.2
18	36	9.1	0.2
19	38	8.7	-0.2
20	40	8.9	0.0
21	42	9.0	0.1
22	44	9.0	0.1
23	46	9.1	0.2
24	48	8.8	-0.1
25	50	9.0	0.1
26	52	8.8	-0.1
27	54	8.8	-0.1

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 0.71 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	8.8	-0.1
2	4	9.0	0.1
3	6	9.1	0.2
4	8	9.0	0.1
5	10	9.1	0.2
6	12	9.0	0.1
7	14	9.0	0.1
8	16	8.9	0.0
9	18	8.8	-0.1
10	20	9.0	0.1
11	22	9.1	0.2
12	24	9.0	0.1
13	26	8.8	-0.1
14	28	9.0	0.1
15	30	9.0	0.1
16	32	8.9	0.0
17	34	8.8	-0.1
18	36	8.7	-0.2
19	38	8.8	-0.1
20	40	9.0	0.1
21	42	8.9	0.0
22	44	9.1	0.2
23	46	9.0	0.1
24	48	8.9	0.0
25	50	9.1	0.2
26	52	9.1	0.2
27	54	9.0	0.1

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 0.85 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	8.9	0.0
2	4	9.0	0.1
3	6	9.1	0.2
4	8	9.0	0.1
5	10	9.1	0.2
6	12	8.9	0.0
7	14	9.1	0.2
8	16	9.2	0.3
9	18	9.0	0.1
10	20	9.0	0.1
11	22	9.1	0.2
12	24	9.0	0.1
13	26	8.9	0.0
14	28	8.9	0.0
15	30	8.8	-0.1
16	32	8.8	-0.1
17	34	8.8	-0.1
18	36	9.0	0.1
19	38	8.9	0.0
20	40	9.0	0.1
21	42	9.0	0.1
22	44	9.1	0.2
23	46	9.0	0.1
24	48	8.9	0.0
25	50	9.0	0.1
26	52	9.0	0.1
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 0.99 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	8.9	0.0
2	4	8.9	0.0
3	6	8.8	-0.1
4	8	8.9	0.0
5	10	8.8	-0.1
6	12	8.9	0.0
7	14	9.0	0.1
8	16	9.1	0.2
9	18	9.1	0.2
10	20	9.0	0.1
11	22	9.0	0.1
12	24	9.1	0.2
13	26	9.0	0.1
14	28	9.1	0.2
15	30	9.1	0.2
16	32	9.0	0.1
17	34	8.8	-0.1
18	36	8.9	0.0
19	38	9.0	0.1
20	40	8.8	-0.1
21	42	8.8	-0.1
22	44	8.9	0.0
23	46	8.8	-0.1
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.8	-0.1
26	52	9.0	0.1
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 1.17 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	8.9	0.0
2	4	9.0	0.1
3	6	9.1	0.2
4	8	9.1	0.2
5	10	9.0	0.1
6	12	8.9	0.0
7	14	8.9	0.0
8	16	8.9	0.0
9	18	9.0	0.1
10	20	8.8	-0.1
11	22	8.7	-0.2
12	24	8.8	-0.1
13	26	8.8	-0.1
14	28	8.7	-0.2
15	30	8.8	-0.1
16	32	8.8	-0.1
17	34	8.8	-0.1
18	36	8.9	0.0
19	38	9.0	0.1
20	40	8.9	0.0
21	42	8.9	0.0
22	44	8.9	0.0
23	46	8.9	0.0
24	48	9.0	0.1
25	50	9.1	0.2
26	52	9.0	0.1
27	54	9.0	0.1

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 1.35 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	9.0	0.1
2	4	9.0	0.1
3	6	9.1	0.2
4	8	9.1	0.2
5	10	8.9	0.0
6	12	9.1	0.2
7	14	9.0	0.1
8	16	9.1	0.2
9	18	8.9	0.0
10	20	9.0	0.1
11	22	9.0	0.1
12	24	9.1	0.2
13	26	9.1	0.2
14	28	9.2	0.3
15	30	9.0	0.1
16	32	9.1	0.2
17	34	9.2	0.3
18	36	9.2	0.3
19	38	9.0	0.1
20	40	8.9	0.0
21	42	8.8	-0.1
22	44	8.9	0.0
23	46	8.8	-0.1
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.7	-0.2
26	52	8.8	-0.1
27	54	8.8	-0.1

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 1.47 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	9.0	0.1
2	4	9.1	0.2
3	6	9.2	0.3
4	8	9.3	0.4
5	10	9.3	0.4
6	12	9.4	0.5
7	14	9.4	0.5
8	16	9.4	0.5
9	18	9.2	0.3
10	20	9.2	0.3
11	22	9.0	0.1
12	24	8.8	-0.1
13	26	8.7	-0.2
14	28	8.7	-0.2
15	30	8.6	-0.3
16	32	8.7	-0.2
17	34	8.8	-0.1
18	36	8.8	-0.1
19	38	8.8	-0.1
20	40	8.8	-0.1
21	42	8.8	-0.1
22	44	8.9	0.0
23	46	9.0	0.1
24	48	8.9	0.0
25	50	8.9	0.0
26	52	9.0	0.1
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 1.65 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.9	0.0
1	2	9.0	0.1
2	4	9.0	0.1
3	6	9.2	0.3
4	8	9.3	0.4
5	10	9.5	0.6
6	12	9.6	0.7
7	14	9.6	0.7
8	16	9.5	0.6
9	18	9.4	0.5
10	20	9.3	0.4
11	22	9.1	0.2
12	24	9.0	0.1
13	26	8.9	0.0
14	28	8.7	-0.2
15	30	8.7	-0.2
16	32	8.6	-0.3
17	34	8.4	-0.5
18	36	8.5	-0.4
19	38	8.6	-0.3
20	40	8.7	-0.2
21	42	8.9	0.0
22	44	9.0	0.1
23	46	8.9	0.0
24	48	8.8	-0.1
25	50	8.9	0.0
26	52	8.8	-0.1
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 1.89 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.8	-0.1
1	2	9.2	0.3
2	4	9.4	0.5
3	6	9.8	0.9
4	8	10.1	1.2
5	10	10.3	1.4
6	12	10.4	1.5
7	14	10.4	1.5
8	16	10.4	1.5
9	18	10.2	1.3
10	20	10.1	1.2
11	22	9.5	0.6
12	24	9.1	0.2
13	26	9.0	0.1
14	28	8.6	-0.3
15	30	8.1	-0.8
16	32	8.0	-0.9
17	34	7.9	-1.0
18	36	7.9	-1.0
19	38	7.8	-1.1
20	40	8.1	-0.8
21	42	8.4	-0.5
22	44	8.6	-0.3
23	46	8.8	-0.1
24	48	9.0	0.1
25	50	9.0	0.1
26	52	8.9	0.0
27	54	8.9	0.0

Material: Brita 9.5/19

Caudal: 2.00 l/s

Ponto nº	a [cm]	F [cm]	f [cm]
-	0	8.7	-0.2
1	2	9.1	0.2
2	4	9.4	0.5
3	6	9.6	0.7
4	8	10.0	1.1
5	10	10.5	1.6
6	12	10.7	1.8
7	14	10.8	1.9
8	16	10.7	1.8
9	18	10.7	1.8
10	20	10.5	1.6
11	22	9.8	0.9
12	24	9.4	0.5
13	26	9.1	0.2
14	28	8.8	-0.1
15	30	8.3	-0.6
16	32	7.9	-1.0
17	34	7.5	-1.4
18	36	7.4	-1.5
19	38	7.3	-1.6
20	40	7.5	-1.4
21	42	7.9	-1.0
22	44	8.2	-0.7
23	46	8.6	-0.3
24	48	8.8	-0.1
25	50	9.0	0.1
26	52	9.1	0.2
27	54	9.0	0.1

