



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**Determinação de caudais em comportas para  
diferentes situações de escoamento**

**Jorge Filipe Pedras Ramalho**

Orientador: Prof. Manuel Rijo (U. Évora)

Coorientador: Prof. Carlos Otero Silva (U. Algarve)

**Mestrado em Engenharia Civil**

Área de especialização: Hidráulica e Recursos Hídricos

Dissertação

Évora, 2015





**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**Determinação de caudais em comportas para  
diferentes situações de escoamento**

**Jorge Filipe Pedras Ramalho**

Orientador: Prof. Manuel Rijo (U. Évora)

Coorientador: Prof. Carlos Otero Silva (U. Algarve)

**Mestrado em Engenharia Civil**

Área de especialização: Hidráulica e Recursos Hídricos

Dissertação

Évora, 2015



*À minha mãe e ao meu irmão*

## **Agradecimentos**

Começo por agradecer aos professores, Manuel Rijo e Carlos Otero Silva, pela orientação, disponibilidade prestada e pelas sugestões feitas em todas as etapas desta dissertação.

Agradeço à minha mãe e ao meu irmão por todo o apoio e força que me transmitiram para conseguir realizar todo este trabalho.

Agradeço à Jéssica por toda a atenção e motivação que me deu ao longo deste trabalho, que esteve sempre presente.

Agradeço a todas as pessoas que em algum momento me ajudaram e pelas suas palavras de amizade e incentivo.

## Resumo

A vazão em comportas planas verticais foi determinada através de vários métodos de cálculo, sendo alguns calibrados com medições realizadas em canal laboratorial. As equações testadas baseiam-se nos métodos da energia-quantidade de movimento, algumas considerando um fator de correção, e no teorema dos *III* da análise dimensional. O estudo foi desenvolvido para as situações de ressalto hidráulico livre e submerso.

Entre todas as formulações consideradas, obteve-se um erro médio geral para escoamento com ressalto livre de 4% e com ressalto submerso de 9%. Para ressalto livre, o método mais preciso gerou erros próximos de 2% e, para ressalto submerso, o método mais preciso obteve um erro médio de 4%.

Foram também comparadas algumas equações de fronteira, entre o ressalto livre e submerso, tendo-se concluído que uma das equações garante maior rigor na definição dessa fronteira.

**Palavras-chave:** Comportas; equações da vazão; ressalto hidráulico; ressalto livre; ressalto submerso.

# Determination of discharge in sluice gates for different flow conditions

## Abstract

Discharge in vertical sluice gates was computed by different calculation methods, some of them calibrated with measurements performed in a laboratory canal. The tested equations are based in energy-momentum method, some of them consider a correction factor, and in a method based on  $\Pi$ -theorem of the dimensional analysis. The study was developed for free and submerged flow.

From all the equations considered, there were obtained an overall average error for free flow of 4% and for submerged flow of 9%. In free flow, the most accurate method obtained an error close to 2% and in submerged flow, the most accurate method an error of 4%.

Were also compared some equations of distinguishing condition, which function is determine the type of hydraulic jump. One of the considered equations gave the best result and accuracy in the definition of the frontier between free and submerged flow.

**Keywords:** Gates; discharge equations; hydraulic Jump; free flow; submerged flow.



# Índice Geral

Agradecimentos .....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice Geral .....	iv
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas.....	viii
Lista de Símbolos.....	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Organização.....	2
2 Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 Comportas hidráulicas.....	3
2.1.1 Elementos básicos constituintes .....	3
2.1.2 Tipos de comportas .....	4
2.1.3 Vantagens e desvantagens no cálculo da vazão .....	5
2.2 Caracterização do ressalto hidráulico .....	6
2.2.1 Classificação do ressalto hidráulico.....	7
2.2.2 Alturas conjugadas .....	8
2.3 Equações de vazão de comportas .....	9
2.3.1 Equações da energia-quantidade de movimento .....	9
2.3.1.1 Dedução da equação de vazão.....	9
2.3.1.1.1 Coeficiente de contração .....	10
2.3.1.1.2 Coeficiente de vazão .....	11
2.3.1.2 Equações de Henry.....	11
2.3.1.3 Equações de Henderson.....	12
2.3.1.4 Equações de Rajaratnam e Subramanya.....	13
2.3.1.5 Equações de Bos.....	14
2.3.1.6 Equações de Swamee.....	14
2.3.1.7 Equações de Lin, Tsai e Yen.....	15
2.3.2 Equações da energia-quantidade de movimento com fator de correção .....	17

2.3.2.1	Equações de Belaud, Cassan e Baume .....	17
2.3.2.2	Equações de Habibzadeh, Vatankah e Rajaratnam.....	19
2.3.3	Equações de Ferro.....	20
3	Instalação e Metodologia Experimentais.....	22
3.1	Laboratório e instrumentação .....	22
3.1.1	Canal.....	22
3.1.2	Comporta plana vertical.....	24
3.1.2.1	Limites de aplicação da comporta.....	24
3.1.3	Comporta descarregadora plana inclinada .....	25
3.1.4	Descarregador triangular de soleira delgada .....	25
3.1.4.1	Limites de aplicação do descarregador.....	27
3.1.5	Instrumentos de medição .....	28
3.2	Adaptações nos equipamentos.....	29
3.3	Procedimento experimental .....	31
3.3.1	Medição das alturas de água.....	31
3.3.2	Ensaio realizados .....	32
3.4	Tratamento de dados.....	33
3.4.1	Precisão das medições .....	33
3.4.2	Calibração do método de Ferro .....	34
4	Análise de Resultados .....	38
4.1	Comparação entre caudais calculados e medidos .....	38
4.1.1	Escoamento com ressalto hidráulico livre .....	38
4.1.2	Escoamento com ressalto hidráulico submerso .....	41
4.2	Erro gerado pelos métodos de cálculo.....	43
4.2.1	Erro percentual absoluto médio .....	43
4.2.1.1	Análise de resultados das equações do grupo I.....	44
4.2.1.2	Análise de resultados das equações do grupo II.....	45
4.2.1.3	Análise de resultados das equações do grupo III.....	46
4.2.2	Erro percentual absoluto médio obtido de cada método de cálculo .....	48
4.3	Equações de fronteira .....	49
5	Conclusões.....	52
	Referências Bibliográficas .....	54

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema dos elementos básicos de uma comporta.....	3
Figura 2.2 - Exemplos de comportas usadas em canais controlados (Rijo, 2010). .....	4
Figura 2.3 - escoamento em comporta: a) ressalto livre; b) ressalto submerso (Henderson, 1966). 6	
Figura 2.4 - Representação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico. ....	8
Figura 2.5 - Coeficiente de vazão obtido experimentalmente (Henry, 1950).....	11
Figura 2.6 - Fronteira teórica obtida pela equação 2.29 (Yen et al., 2001). .....	16
Figura 2.7 - Determinação do coeficiente de contração (Belaud et al. 2009). .....	18
Figura 3.1 - Canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Évora. ....	22
Figura 3.2 - Esquema do canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Évora.....	23
Figura 3.3 - Comporta plana vertical utilizada nos ensaios laboratoriais. ....	24
Figura 3.4 - Batente da comporta plana vertical (Bos, 1989). .....	24
Figura 3.5 - Descarregador triangular utilizado nos ensaios laboratoriais. ....	25
Figura 3.6 - Esquema do descarregador triangular de soleira delgada (Henriques et al., 2007).....	26
Figura 3.7 - Diagrama do coeficiente de vazão para o descarregador triangular (Henriques et al., 2007). .....	27
Figura 3.8 - Dimensões da crista do descarregador triangular de soleira delgada (Bos, 1989).....	27
Figura 3.9 – Medição de altura de água com hidrómetro. ....	29
Figura 3.10 - Sistema de reforço aplicado na comporta. ....	29
Figura 3.11 - Rede de estabilização do escoamento na descarga para o tabuleiro.....	30
Figura 3.12 - Isolamento nas juntas de contacto do descarregador com o tabuleiro. ....	30
Figura 3.13 - Alturas de água a registar em canal para ressalto livre e submerso (Lin et al., 2002). .....	31
Figura 3.14 - Representação dos ensaios obtidos sobre o diagrama de Henry (1950).....	33
Figura 3.15 - Linhas de tendência para calibrar o método de Ferro para ressalto livre. ....	36
Figura 3.16 - Linhas de tendência para calibrar o método de Ferro para ressalto submerso. ....	37
Figura 4.1 - Comparação das equações do grupo I com o caudal medido na situação de ressalto livre.....	38
Figura 4.2 - Comparação das equações do grupo II com o caudal medido na situação de ressalto livre.....	39

Figura 4.3 - Comparação das equações do grupo III com o caudal medido na situação de ressalto livre.....	40
Figura 4.4 - Comparação das equações do grupo I com o caudal medido na situação de ressalto submerso.....	41
Figura 4.5 - Comparação das equações do grupo II com o caudal medido na situação de ressalto submerso.....	42
Figura 4.6 - Comparação das equações do grupo III com o caudal medido na situação de ressalto submerso.....	42
Figura 4.7 - Erro percentual absoluto médio para os diferentes métodos de cálculo nas situações de ressalto livre e submerso. ....	43
Figura 4.8 - Erro percentual absoluto médio por método de cálculo.....	48
Figura 4.9 - Equações de fronteira para os ensaios com ressalto livre.....	50
Figura 4.10 - Equações de fronteira para os ensaios com ressalto submerso.....	50

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Constantes obtidas por Ferro (2000 e 2001).....	21
Tabela 2.2 - Constantes obtidas por Sepúlveda (2008). .....	21
Tabela 3.1 - Medias registadas no descarregador triangular.....	28
Tabela 3.2 - Resultados obtidos dos ensaios laboratoriais. ....	32
Tabela 3.3 - Dados para calibração de Ferro com ressalto livre. ....	35
Tabela 3.4 - Dados para calibração de Ferro com ressalto submerso. ....	35
Tabela 3.5 - Constantes para a calibração do método de Ferro para ressalto livre. ....	36
Tabela 3.6 - Constantes para a calibração do método de Ferro para ressalto submerso. ....	37
Tabela 4.1 - Avaliação dos erros relativos para ressalto submerso calibrados com LAD. ....	47

## Lista de Símbolos

Símbolo	Significado	Unidade
$a$	Abertura relativa da comporta	-
$A$	Parâmetro adimensional de Henry	-
$b$	Altura de abertura da comporta	(m)
$B$	Largura do tabuleiro do descarregador	(m)
$c$	Altura entre a água a jusante do descarregador e o vértice deste	(m)
$C_c$	Coeficiente de contração	-
$c_v$	Coeficiente de velocidade	-
$C_v$	Coeficiente de vazão	-
$d$	Altura desde o rasto do tabuleiro ao vértice do descarregador	(m)
$e$	Erro relativo	(%)
$e_{am}$	Erro percentual absoluto médio	(%)
$E$	Energia específica	(m)
$F_r$	Número de Froude	-
$g$	Aceleração da gravidade	(m/s <sup>2</sup> )
$h$	Altura de água	(m)
$h_c$	Altura crítica do escoamento	(m)
$h_G$	Profundidade do centro de gravidade da área líquida transversal	(m)
$h_v$	Altura de água sobre o vértice do descarregador	(m)
$h'_2$	Altura de água a montante do ressalto hidráulico submerso	(m)
$N$	Número de ensaios realizados	-
$k$	Fator de correção para as perdas de energia na comporta	(m)
$k_h$	Fator de correção da energia específica no descarregador	(m)
$k_0, k_1$	Constantes para escoamento livre do método de Ferro	-
$k'_0, k'_1$	Constantes para escoamento submerso do método de Ferro	-
$K$	Parâmetro adimensional de Henry	-

Símbolo	Significado	Unidade
$L$	Largura da comporta	(m)
$L_h$	Distância de medição de $h_v$	(m)
$Q$	Caudal	(m <sup>3</sup> /s)
$Q_{cal}$	Caudal calculado	(m <sup>3</sup> /s)
$Q_{med}$	Caudal medido	(m <sup>3</sup> /s)
$r$	Razão entre perímetro não contraído e perímetro total de um orifício	-
$s$	Razão de submersão	-
$S$	Área líquida transversal	(m <sup>2</sup> )
$S^*$	Tipo de submersão	-
$U$	Velocidade média do escoamento	(m/s)
$\gamma$	Peso volúmico da água	(N/m <sup>3</sup> )
$\eta, \lambda, \xi$	Parâmetros adimensionais	-
$\emptyset$	Ângulo do descarregador triangular	(graus)

# **1 Introdução**

## **1.1 Enquadramento**

A água é um recurso natural essencial à vida. Sendo a base do desenvolvimento humano é necessário garantir a sua disponibilidade em qualidade e quantidade.

A exploração da água tem vindo a aumentar nas últimas décadas devido ao rápido crescimento da população mundial (WWAP, 2009). Atualmente existem cerca de 7 biliões de pessoas no mundo e em 2050 estima-se que existam 9 biliões (WWAP, 2009).

O consumo de água está distribuído pelos setores agrícola, industrial e urbano. O setor que mais água consome é o agrícola, sendo responsável por mais de 70% do consumo de água mundial (UN, 2006). Tendo em conta que a eficiência do uso da água neste setor é inferior a 40% (UN, 2006), existe uma grande parte que não é aproveitada. Associando a isto o facto de se estimar um aumento da temperatura global superior a 2 graus Celsius até ao final do século (IPCC, 2013), fica evidente que todos os fatores aqui considerados obrigam a uma gestão mais eficiente da água, de forma a reduzir as perdas e a assegurar o seu fornecimento.

No sentido de gerir melhor a água promovendo uma utilização eficiente, decorre em Portugal o Programa Nacional do Uso Eficiente da Água (PNUEA), com implementação para 2012-2020. O objetivo do PNUEA é reduzir as perdas de água e otimizar o seu uso, nos três setores de abastecimento, de forma a contribuir para uma utilização sustentável deste recurso. Uma das medidas deste programa é a modernização das redes hidráulicas e é neste contexto que se insere a presente dissertação.

As comportas hidráulicas instaladas em canal têm a função de controlar o escoamento, sendo possível calcular a vazão nestas estruturas. Com um método de cálculo adequado pode ser determinado o caudal em comportas, permitindo controlar a adução de água necessária para exploração, diminuindo as perdas de água e aumentando a eficiência no transporte, preservando o meio ambiente.

## **1.2 Objetivos**

Pretende-se com este trabalho reunir as principais equações da vazão em comportas disponíveis na literatura e avaliar os seus desempenhos comparativamente com um conjunto de ensaios realizados em canal laboratorial, para várias situações de escoamento. Algumas das equações têm de ser calibradas com os resultados medidos nos ensaios, para melhorar o seu desempenho.



A componente prática realizou-se no canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Évora, equipado com uma comporta plana vertical e um descarregador triangular de soleira delgada.

### **1.3 Organização**

A presente dissertação está organizada em revisão bibliográfica, instalação e metodologia experimentais, análise de resultados e conclusões.

Na revisão bibliográfica são referidos os conceitos relacionados com o escoamento em comportas instaladas em canal e apresentados alguns dos principais métodos de cálculo da vazão em comportas, desenvolvidos nas últimas décadas.

Em instalação e metodologia experimentais é realizada a descrição dos equipamentos utilizados, dos ensaios desenvolvidos no canal laboratorial e o tratamento de dados.

A análise de resultados é feita avaliando o desempenho de cada um dos métodos de cálculo considerados, comparando os valores obtidos com os resultados experimentais.

Nas conclusões são comentados os principais resultados obtidos e sugeridas recomendações para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Comportas hidráulicas

As comportas hidráulicas são estruturas que têm como principal função controlar o escoamento, ajustando os níveis de água e/ou os caudais desejados, de acordo com as necessidades de exploração. Estas estruturas são utilizadas em várias construções de engenharia, podendo ser instaladas em descarregadores de barragem, em eclusas e em canais de adução e drenagem, entre outras aplicações.

Nos canais de adução, as alturas de água podem ser controladas por descarregadores e por comportas, para que: a superfície livre nos canais domine por gravidade toda a zona a beneficiar; as tomadas de água possam ser alimentadas em boas condições; se evitem galgamentos de canal; se reduzam os tempos de resposta dos canais; se reduzam as perdas de água operacionais ou devidas ao controlo (Rijo, 2010).

#### 2.1.1 Elementos básicos constituintes

Os elementos básicos que constituem uma comporta são o tabuleiro, peças fixas e o mecanismo de manobra. A Figura 2.1 apresenta o esquema de uma comporta plana vertical.

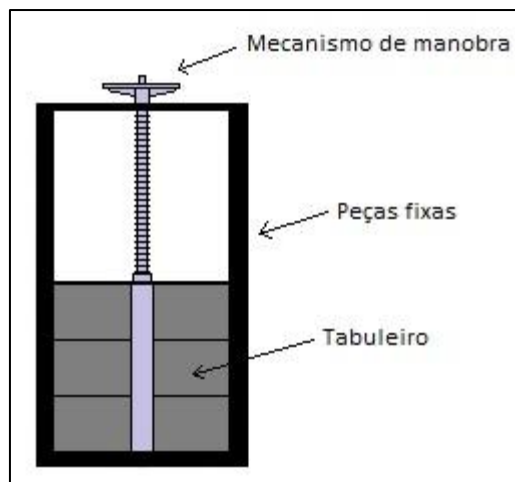


Figura 2.1 - Esquema dos elementos básicos de uma comporta.

O tabuleiro representa o elemento principal da comporta, que serve de barreira à passagem do escoamento. Este elemento pode ser reforçado por vigamentos de forma a resistir melhor aos esforços provocados pela água. As peças fixas são elementos que ficam inseridos na estrutura que dá suporte à comporta (ou quadro da comporta) e têm a função de absorver os

esforços que esta recebe, proporcionando estabilidade. O mecanismo de manobra tem a função de ajustar a abertura da comporta conforme as necessidades.

Dependendo do tipo de comporta, a sua abertura pode ser acionada manualmente, através da impulsão da água ou de forma motorizada, podendo ser, neste último caso, atuada através de autómatos<sup>(1)</sup>. No que respeita à estanquicidade, esta pode ser obtida através do contacto entre os seus elementos ou através de juntas isoladoras.

### 2.1.2 Tipos de comportas

Na Figura 2.2, apresentam-se alguns tipos de comporta comuns em canal.

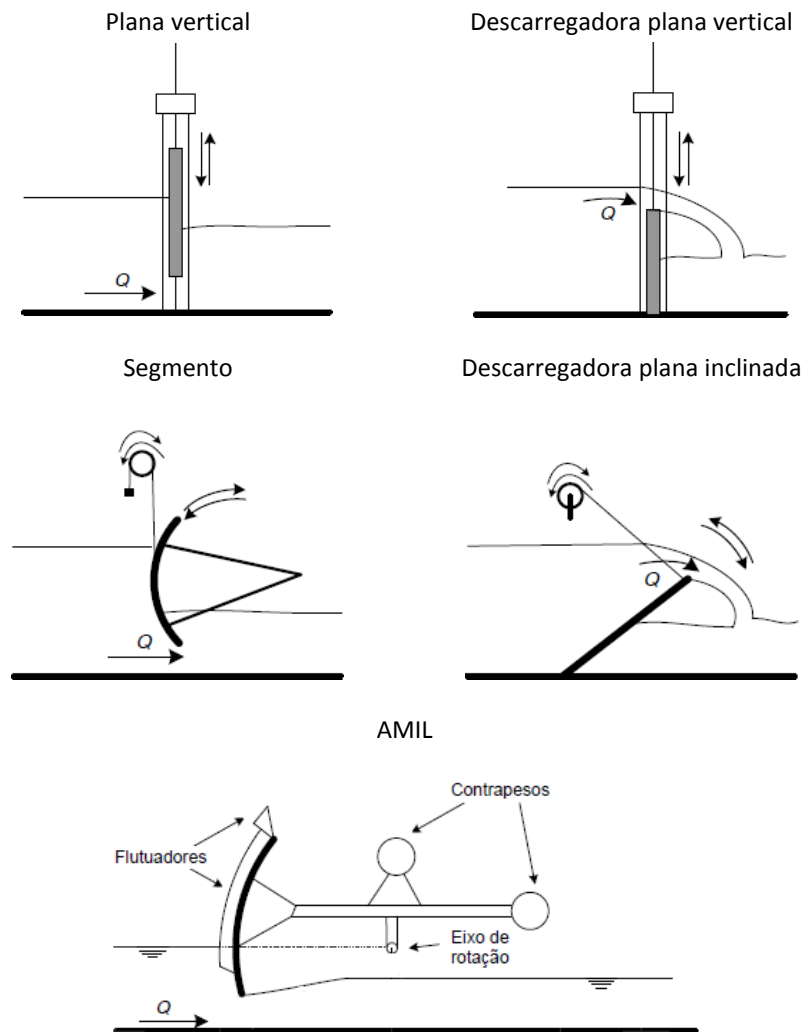


Figura 2.2 - Exemplos de comportas usadas em canais controlados (Rijo, 2010).

<sup>(1)</sup> Autómato é um equipamento eletrónico programado pelo utilizador, responsável pelo comando dos sistemas automatizados.

Com base na Figura 2.2, pode concluir-se que, dependendo do tipo de comporta, esta pode funcionar como orifício retangular, quando tem abertura inferior (à exceção da AMIL®), ou como descarregador, dando-se o escoamento pela parte superior. Qualquer um dos tipos de comporta indicados, à exceção da comporta AMIL®, pode ter o mecanismo de manobra manual ou motorizado. A comporta AMIL® é autorregulada por um sistema de flutuadores e contrapesos que rodam em torno de um eixo horizontal.

As comportas apresentadas permitem controlar o escoamento a montante, fazendo variar a área da sua abertura. Entre a comporta plana vertical e a de segmento pode destacar-se o facto de a primeira requerer uma menor área de implantação e ser mais económica que a comporta de segmento, no entanto esta última necessita de menor força para a sua manobra (Clemmens *et al.*, 2003).

Nas comportas descarregadoras, a plana vertical é mais limitada em termos de variação da altura. No entanto, para grandes caudais, a comporta descarregadora inclinada necessita de um sistema motorizado com maiores gastos de energia para poder efetuar a sua regulação.

As comportas AMIL® mantêm o nível de montante a uma cota constante, correspondente à altura de assentamento do seu eixo de rotação, independentemente da vazão. Esta comporta não tem escoamento do tipo orifício, uma vez que o tabuleiro não tem estanquicidade lateral.

### **2.1.3 Vantagens e desvantagens no cálculo da vazão**

A principal função das comportas é controlar o escoamento. No entanto, se estiverem devidamente calibradas, é possível calcular o caudal nestas estruturas (Sepúlveda, 2008). Apresentam-se as principais vantagens e desvantagens na utilização de comportas na medição do caudal.

Vantagens:

- Redução de custos e tempo associado ao projeto, construção ou aquisição de estruturas de medição dedicadas e equipamento;
- Pequena perda de carga;
- Melhoramento do controlo automático através de ajustamentos precisos das comportas para rapidamente alcançarem a vazão pretendida.

Desvantagens:

- Menos precisas que os descarregadores;
- A calibração pode ser complexa para todas as condições de escoamento.

## 2.2 Caracterização do ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico é o fenómeno de escoamento rapidamente variado por meio do qual o regime rápido a montante passa bruscamente para o regime lento a jusante (Quintela, 1981). Nestas condições, a superfície livre<sup>(2)</sup> eleva-se rapidamente, existindo uma grande dissipação de energia, devido à transformação da energia cinética em energia potencial (Manzanares, 1980).

A ocorrência do ressalto pode ser a jusante de comportas hidráulicas e de descarregadores, aparecendo também em quedas em canal e em canais evacuadores de cheias associados a barragens. Em canais evacuadores, este fenómeno, ao dissipar uma parte considerável de energia de corrente rápida, permite a restituição ao leito a jusante em condições muito próximas das naturais, reduzindo o risco de erosão das margens e do leito. Nos canais de adução, o ressalto ocorre a jusante de comportas e no final de trechos muito inclinados (Rijo, 2010).

O ressalto hidráulico pode desenvolver-se de forma livre ou submersa. É livre quando a superfície da veia líquida contraída<sup>(3)</sup> contacta com a atmosfera ou outro meio gasoso. É submerso quando se forma uma camada de água turbilhonar sobre a veia líquida contraída, tal como distingue a Figura 2.3. Esta camada turbilhonar tem influência no escoamento a montante, fazendo aumentar a altura de água.

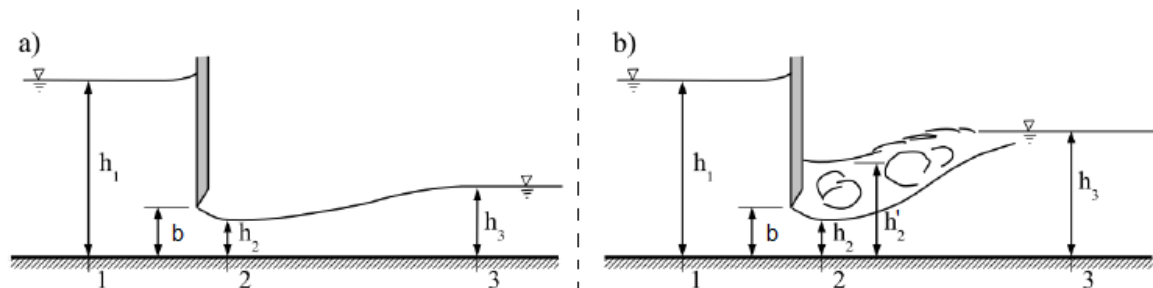


Figura 2.3 - Escoamento em comporta: a) ressalto livre; b) ressalto submerso (Henderson, 1966).

As variáveis apresentadas na Figura 2.3 são:  $h_1$  – altura de água a montante da comporta<sup>(4)</sup> (m);  $b$  – altura de abertura da comporta (m);  $h_2$  – altura da veia líquida na secção contraída (m);  $h'_2$  – altura de água a montante do ressalto hidráulico submerso (m);  $h_3$  – altura de água a jusante do ressalto (m).

<sup>(2)</sup> O escoamento de um líquido ocorre com superfície livre quando uma parte do seu contorno se apresenta em contacto com a atmosfera ou outro meio gasoso.

<sup>(3)</sup> A veia líquida contraída é o jato fluido que sofre a diminuição da secção ao atravessar um orifício.

<sup>(4)</sup> Por norma, na presente dissertação irá usar-se o índice 1 para designar a secção 1, a montante da comporta, o índice 2 para designar a secção 2, na veia líquida contraída do escoamento, e o índice 3 para designar a secção 3, a jusante do ressalto. A ausência de índice refere a secção genérica do canal.

### 2.2.1 Classificação do ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico pode ser classificado tendo em conta o número de Froude de montante. Este número é derivado da equação da energia específica:

$$E = h + \frac{Q^2}{2gS^2} \quad (2.1)$$

Em que  $E$  é a energia específica ( $m$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $h$  a altura de água ( $m$ ),  $Q$  o caudal ( $m^3/s$ ) e  $S$  é a área líquida transversal ( $m^2$ ).

O número de Froude é dado pela equação seguinte, que representa a relação entre a velocidade média do escoamento e a celeridade<sup>(5)</sup> das pequenas perturbações (Manzanares, 1980):

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (2.2)$$

Em que,  $F_r$  é o número de Froude e  $U$  a velocidade média do escoamento ( $m/s$ ).

O escoamento pode ocorrer em três regimes, consoante o número de Froude:

- Regime lento, se  $F_r < 1$ ;
- Regime crítico, se  $F_r = 1$ ;
- Regime rápido, se  $F_r > 1$ .

O ressalto hidráulico, segundo Peterka (1958), pode ser classificado em:

- $F_r \leq 1$  – Para estes valores o regime é lento ou crítico e não há ressalto;
- $1 < F_r < 1,7$  – Ressalto ondulado, aqui as alturas conjugadas<sup>(6)</sup> apresentam pequenas diferenças, havendo suaves ondulações na superfície;
- $1,7 \leq F_r < 2,5$  – Ressalto fraco, origina pequenos rolos na superfície;
- $2,5 \leq F_r < 4,5$  – Ressalto oscilante, ocorrem pulsações que produzem ondas de período irregular, desenvolvendo-se para jusante ao longo de grandes extensões;
- $4,5 \leq F_r < 9$  – Ressalto estável é bem localizado e caracterizado;
- $F_r \geq 9$  – Ressalto forte, apresenta uma intensa formação de vórtices, emulsão de ar e grande turbulência.

---

<sup>(5)</sup> Velocidade relativa da propagação de onda.

<sup>(6)</sup> Alturas de água, a montante e a jusante do ressalto hidráulico, com igual quantidade de movimento total.

## 2.2.2 Alturas conjugadas

As alturas  $h_2$  e  $h_3$ , a montante e a jusante do ressalto hidráulico, respetivamente, apresentadas na Figura 2.4, correspondem às alturas conjugadas, sendo o escoamento em regime rápido na secção 2 e em regime lento na secção 3.

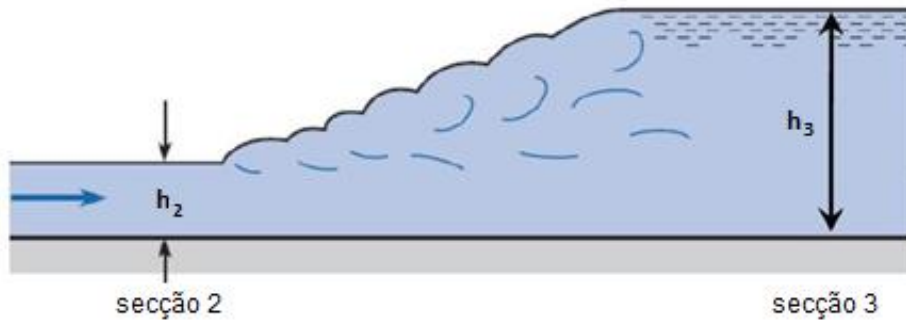


Figura 2.4 - Representação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico.

Para determinar as alturas de água conjugadas do ressalto hidráulico, recorre-se ao teorema da quantidade de movimento aplicado ao volume de líquido limitado pelas secções a montante e a jusante do ressalto (Quintela, 1981), considerando que a quantidade de movimento se mantém constante entre as secções 2 e 3. Para canais prismáticos<sup>(7)</sup> representa-se com a seguinte equação:

$$\gamma S_2 h_{G_2} + \frac{\gamma Q^2}{g S_2} = \gamma S_3 h_{G_3} + \frac{\gamma Q^2}{g S_3} \quad (2.3)$$

Em que,  $h_G$  é a profundidade do centro de gravidade da área líquida transversal (m) e  $\gamma$  o peso volumico da água ( $N/m^3$ ).

As alturas conjugadas do ressalto hidráulico para canais retangulares foram deduzidas por Bélanger (Chow, 1959), considerando a equação 2.3 e tendo em conta o número de Froude de montante do ressalto, obtendo as equações,

$$\frac{h_3}{h_2} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_{r_2}^2} - 1 \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{h_2}{h_3} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_{r_3}^2} - 1 \right) \quad (2.5)$$

<sup>(7)</sup> Canal de secção transversal e declive longitudinal, constantes, ao longo do percurso e com rugosidade constante ao longo de cada geratriz.

## 2.3 Equações de vazão de comportas

Nas últimas décadas, muitos investigadores têm-se dedicado ao estudo da vazão em comportas instaladas em canais, com o objetivo de desenvolver equações que permitam calcular com rigor o caudal.

O método da conservação da energia e da quantidade de movimento total (*E-M*) tem sido amplamente utilizado por vários investigadores (Henry, 1950; Henderson, 1966; Yen *et al.*, 2001) na determinação do caudal com ressalto livre e submerso. Algumas alterações têm sido feitas ao método *E-M*, introduzindo um fator de correção para a energia específica, com a finalidade de melhorar a sua precisão, exemplos disto são os trabalhos de Belaud *et al.* (2009) e Habibzadeh *et al.* (2011). Recentemente, um método baseado no teorema dos *III* da análise dimensional, apresentado em Ferro (2000) para o ressalto livre e em Ferro (2001) e Ansar (2001) para o ressalto submerso, tem sido testado com bons resultados.

### 2.3.1 Equações da energia-quantidade de movimento

No método tradicional da *E-M* é igualada a energia específica da secção a montante da comporta com a energia específica na veia líquida contraída e considerada a conservação da quantidade de movimento total entre a veia líquida contraída e a secção a jusante do ressalto. É assumida uma distribuição hidrostática das pressões e velocidade uniforme nas secções referidas. As perdas de energia entre a secção de montante da comporta e a veia líquida contraída são pequenas, pelo que se podem ignorar, conforme assinalam Henry (1950), Henderson (1966) e Yen *et al.* (2001).

#### 2.3.1.1 Dedução da equação de vazão

Em Henderson (1966), é feita uma dedução teórica da equação para o cálculo da vazão em comportas. Desta dedução resulta também uma equação para o cálculo do coeficiente de vazão para o ressalto livre, como adiante se irá apresentar. São igualadas as energias específicas da secção 1 e 2, isto é,

$$h_1 + \frac{Q^2}{2gL^2h_1^2} = h_2 + \frac{Q^2}{2gL^2h_2^2} \quad (2.6)$$

Em que *L* é a largura da comporta (*m*).



Resolvendo a equação 2.6 em função do caudal, é obtido:

$$Q = Lh_1h_2\sqrt{\frac{2g}{h_1+h_2}} \quad (2.7)$$

Introduzindo o coeficiente de contração,  $C_c$ , na equação 2.7 vem:

$$Q = LC_c b \sqrt{2gh_1 \frac{h_1}{h_1+h_2}} \quad (2.8)$$

Na equação (2.8) considera-se que  $h_2 = C_c b$ .

Daqui resulta a equação para o cálculo do caudal em comportas:

$$Q = C_v L b \sqrt{2gh_1} \quad (2.9)$$

Onde,

$$C_v = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c b/h_1}} \quad (2.10)$$

Em que  $C_v$  é o coeficiente de vazão.

#### 2.3.1.1.1 Coeficiente de contração

Para comportas do tipo plana vertical, vários investigadores consideraram um valor constante de  $C_c$ . Henry (1950) considerou  $C_c=0,60$ , Henderson (1966) utilizou  $C_c= 0,61$ , entre outros.

O valor constante de 0,61 é uma aproximação de  $\pi/(\pi + 2)$ , tendo sido demonstrado por Kirchoff (Henderson, 1966) para o coeficiente de contração de um jato, sem perdas de energia e com pequena deflexão causada pela gravidade, a partir de um orifício retangular ao longo de um grande reservatório.

Em Yen *et al.* (2001), é referido que o coeficiente de contração pode variar ligeiramente em comportas planas verticais em termos teóricos, mas que, na prática, podem ocorrer variações importantes deste coeficiente. Já Belaud *et al.* (2009) referem que o  $C_c$  pode ser bastante superior a 0,61 para grandes aberturas de comporta e grande submersão do ressalto.

### 2.3.1.1.2 Coeficiente de vazão

O coeficiente de vazão pode ser definido como a razão entre o caudal do líquido real e o caudal que se escoaria em idênticas condições se o líquido fosse perfeito, traduzindo-se num ajustamento da lei da vazão para ter em conta as perdas de carga e a distribuição não uniforme de velocidades e de pressões (Rijo, 1993).

Com ressalto livre, o coeficiente de vazão depende de  $C_c$ ,  $h_1$  e  $b$  e, com ressalto submerso, depende de  $C_c$ ,  $h_1$ ,  $b$  e  $h_3$  (Henderson, 1966). Alguns métodos de cálculo consideram o  $C_v$  constante, enquanto noutros este coeficiente é calculado.

### 2.3.1.2 Equações de Henry

Henry (1950) determinou experimentalmente o coeficiente de vazão para o escoamento com ressalto livre e submerso. Os resultados destes ensaios foram dispostos no diagrama adimensionalizado da Figura 2.5.

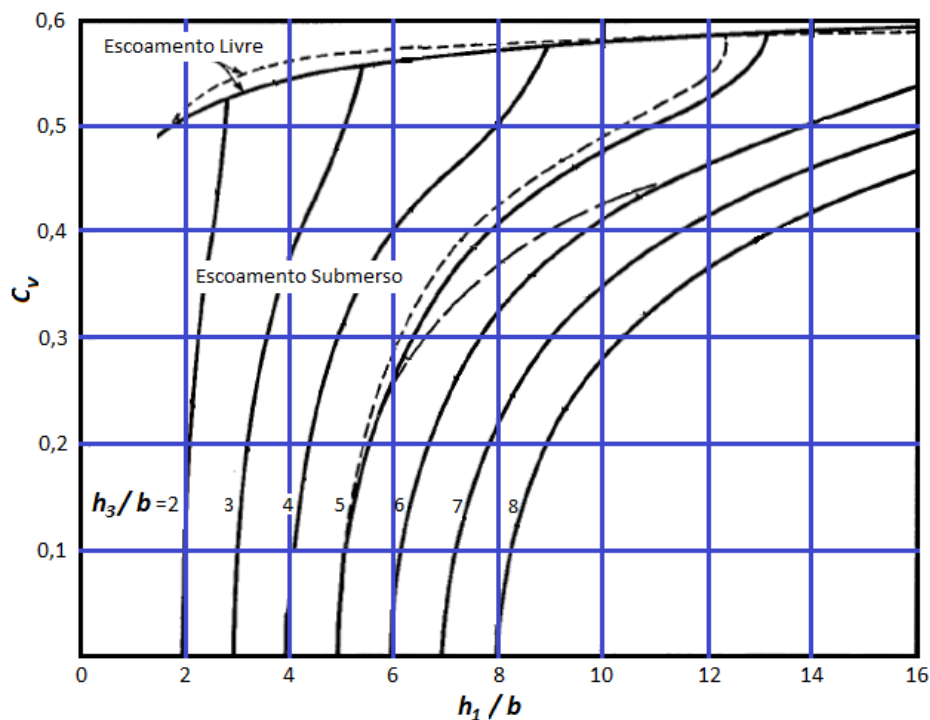


Figura 2.5 - Coeficiente de vazão obtido experimentalmente (Henry, 1950).

Da análise do diagrama da Figura 2.5, pode concluir-se que o coeficiente de vazão diminui com o aumento da submersão do ressalto e que para ressalto submerso pode variar bruscamente

com a pequena alteração de uma das variáveis em presença. Conclui-se ainda que o coeficiente tende para o limite de 0,6 em ressalto livre para valores elevados de  $h_1/b$ .

Henry (1950) completou o seu trabalho com duas equações do coeficiente de vazão, determinadas a partir do método *E-M*, que se aproximam das curvas obtidas no diagrama da Figura 2.5. Estes coeficientes de vazão são aplicados na equação 2.9 para calcular o caudal.

A Figura 2.5 apresenta a traço interrompido curto os valores do coeficiente de vazão dados pela equação,

$$C_v = K C_c \sqrt{1 - h'_2/h_1} \quad (2.11)$$

Em que,  $K = 1/\sqrt{1 - (C_c b/h_1)^2}$  é um parâmetro adimensional, para o qual Henry considerou  $C_c = 0,6$ . Para ressalto submerso, é usado  $h'_2$  e para ressalto livre é usado  $h_2$ .

A Figura 2.5 apresenta a traço interrompido mais comprido os valores do coeficiente de vazão dados pela equação,

$$C_v = C_c \sqrt{1 - h_3/h_1} \quad (2.12)$$

Henry (1950) considerou esta última equação para calcular o coeficiente de vazão em situações de maior submersão.

### 2.3.1.3 Equações de Henderson

Henderson (1966) deduziu, teoricamente a partir do método *E-M*, a equação de cálculo do coeficiente de vazão para o ressalto livre, dado pela equação 2.10. Para calcular o coeficiente de vazão com ressalto submerso, em Yen *et al.* (2001) é apresentada a seguinte equação, deduzida com base nos conceitos de Henderson (1966), tendo em conta a conservação de energia específica entre as secções 1 e 2 e a conservação da quantidade de movimento total, entre as secções 2 e 3,

$$C_v = C_c \frac{\left[ \xi - \sqrt{\xi^2 - \left(\frac{1}{\eta^2} - 1\right)^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right)} \right]^{1/2}}{\frac{1}{\eta} - \eta} \quad (2.13)$$

Em que  $\eta = C_c b/h_1$ ,  $\lambda = h_1/h_3$  e  $\xi = (1/\eta - 1)^2 + 2(\lambda - 1)$  são parâmetros adimensionais e  $C_c = 0,61$ .

Os coeficientes de vazão obtidos são introduzidos na equação 2.9 para calcular o caudal.

### 2.3.1.4 Equações de Rajaratnam e Subramanya

De acordo com Rajaratnam e Subramanya (1967) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) foram obtidas as equações que seguem, respetivamente, para o cálculo do caudal com ressalto livre e com ressalto submerso,

$$Q = C_v L b \sqrt{2g(h_1 - C_c b)} \quad (2.14)$$

$$Q = C_v L b \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (2.15)$$

Nestas equações é utilizado  $C_c = 0,61$  e o coeficiente de vazão é dado por:

$$C_v = 0,61 / \sqrt{1 - 0,372(h_1/b)^{-2}} \quad (2.16)$$

A equação 2.15 para o cálculo do caudal com ressalto submerso considera a altura  $h_2$ , relativa à altura de água na veia contraída a jusante da comporta. No entanto, nestas condições, existe a almofada de água sobre a veia líquida contraída, o que impossibilita a determinação desta altura com precisão. Estes investigadores determinaram para o cálculo de  $h_2$ , a seguinte equação:

$$h_2 = b C_v \left[ 2 \left( 1 - \frac{b C_v}{h_3} \right) + \sqrt{4 \left( 1 - \frac{b C_v}{h_3} \right)^2 + \left( \frac{h_3}{b C_v} \right)^2 - 4 \left( \frac{h_1}{b C_v} - \frac{h_1}{h_3} \right)} \right] \quad (2.17)$$

As equações que fazem a separação entre as duas situações de ressalto são designadas por equações de fronteira. Em Rajaratnam e Subramanya (1967) *apud* Bijankhan e Kouchakzadeh (2011) foi determinada a equação seguinte, para saber se o escoamento ocorre com ressalto livre ou submerso:

$$h_3 = b \times \frac{C_v}{2} \left( \sqrt{1 + 16 \frac{(h_1/b) - 0,61}{C_v}} - 1 \right) \quad (2.18)$$

O ressalto é livre se os valores da altura  $h_3$ , medidos em canal, forem inferiores aos obtidos pela equação 2.18 e é submerso quando os valores medidos são superiores aos da equação 2.18. O mesmo é válido para todas as equações de fronteira que se apresentam ao longo deste capítulo.

### 2.3.1.5 Equações de Bos

Bos (1989) apresenta as duas equações que seguem, respetivamente, para calcular o caudal com ressalto livre e submerso:

$$Q = C_v \times c_v L b \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (2.19)$$

$$Q = C_v \times c_v L b \sqrt{2g(h_1 - h'_2)} \quad (2.20)$$

Em que  $c_v$  é o coeficiente de velocidade e que por ter valores muito próximos da unidade não se irá considerar para efeitos de cálculo.

Bos (1989) considera um valor de 0,61 para o coeficiente de vazão nos orifícios com contração total. Se não houver contração nalgum dos lados do orifício, como acontece com as comportas sem contração lateral (da mesma largura do canal) e sem soleira associada, o coeficiente de vazão deve ser determinado pela equação,

$$C_v = 0.61(1 + 0.15r) \quad (2.21)$$

Em que  $r$  é a razão entre o perímetro não contraído e o perímetro total do orifício.

No ressalto submerso, Bos (1989) refere que a sua formulação é mais precisa na obtenção do caudal que o diagrama de Henry (1950), que pode originar erros elevados quando a diferença entre  $h_1/b$  e  $h_3/b$  é inferior à unidade.

É também sugerida uma equação de fronteira em Bos (1989), dada por:

$$h_3 = b \times \frac{C_c}{2} \left[ \sqrt{1 + 16 \left( \frac{h_1}{C_c b} - 1 \right)} - 1 \right] \quad (2.22)$$

### 2.3.1.6 Equações de Swamee

As equações de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) foram determinadas a partir de uma análise regressiva ao diagrama de Henry (1950) para poder calcular o coeficiente de vazão, obtendo as duas equações que seguem, respetivamente, para o escoamento com ressalto livre e submerso,

$$C_v = 0,611 \left( \frac{h_1 - b}{h_1 + 15b} \right)^{0,072} \quad (2.23)$$

$$C_v = 0,611 \left( \frac{h_1 - b}{h_1 + 15b} \right)^{0,072} \left[ 0,32 \left( \frac{0,81h_3(h_3/b)^{0,72} - h_1}{h_1 - h_3} \right)^{0,7} + 1 \right]^{-1} \quad (2.24)$$

O caudal é calculado aplicando os valores do coeficiente de vazão obtidos pelas equações 2.23 e 2.24 na equação 2.9.

Este investigador estabeleceu a equação de fronteira entre o ressalto livre e submerso que se segue:

$$h_3 = \frac{h_1}{0,81 \times (h_3/b)^{0,72}} \quad (2.25)$$

### 2.3.1.7 Equações de Lin, Tsai e Yen

Em Yen *et al.* (2001) e Lin *et al.* (2002) foram desenvolvidos ensaios para o escoamento em comportas e concluíram que o  $C_c$  varia com a abertura da comporta, o tipo de comporta, o tipo de batente e com a altura de água a montante da comporta.

Com base nas equações *E-M* e considerando a influência do  $C_c$ , estes investigadores apresentaram equações de cálculo do coeficiente de vazão para a situação de ressalto livre e submerso, uma equação para fazer a fronteira entre as duas situações de ressalto e outra equação para calcular a altura de água  $h'_2$ .

Quando a abertura da comporta é igual ou superior à altura crítica, não há ressalto hidráulico. Nesta situação, a comporta não consegue controlar o escoamento, apenas causa alguma perturbação na superfície (Yen *et al.* 2001). Desta forma, a comporta tem de estar sempre com uma altura de abertura inferior à altura crítica, para haver controlo do escoamento. Em canais retangulares, a altura crítica,  $h_c$  é definida pela equação seguinte:

$$h_c = \left( \frac{Q^2}{gL^2} \right)^{1/3} \quad (2.26)$$

O coeficiente de vazão para ressalto livre apresentado em Yen *et al.* (2001) é dado pela equação 2.10 com  $C_c = 0,6$ . O coeficiente de vazão para ressalto submerso é obtido pela equação,

$$C_v = C_c \sqrt{\frac{1 - \frac{h'_2}{h_1}}{1 - \left(\frac{C_c b}{h_1}\right)^2}} \quad (2.27)$$

Os coeficientes de vazão obtidos por estas equações são introduzidos na equação 2.9 para calcular o caudal. Yen *et al.* (2001), para obterem a altura de água  $h'_2$ , considerando a quantidade de movimento total e o coeficiente de contração, estabeleceram a equação que segue:

$$\frac{h'_2}{h_1} = \frac{2\left(\frac{1}{\eta} - \lambda\right)}{\left(\frac{1}{\eta}\right)^2 - 1} + \sqrt{\left[\frac{2}{\left(\frac{1}{\eta}\right)^2 - 1}\left(\frac{1}{\eta} - \lambda\right) - 1\right]^2 - \left[1 - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right]} \quad (2.28)$$

A equação de fronteira apresentada por estes investigadores foi obtida teoricamente envolvendo a equação 2.6 da energia específica, a equação 2.2 do número de Froude, e a equação 2.4 das alturas conjugadas. Sendo  $h_{3_{max}}^{(8)}$  a máxima altura a jusante para o ressalto livre, a equação que define a fronteira com o ressalto hidráulico submerso é dada por:

$$h_{3_{max}} = C_c b \times \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{16}{\frac{C_c b}{h_1} \left(1 + \left(\frac{C_c b}{h_1}\right)\right)}} - 1 \right) \quad (2.29)$$

A Figura 2.6 mostra a fronteira teórica obtida pela equação 2.29, separando o escoamento com ressalto livre do submerso.

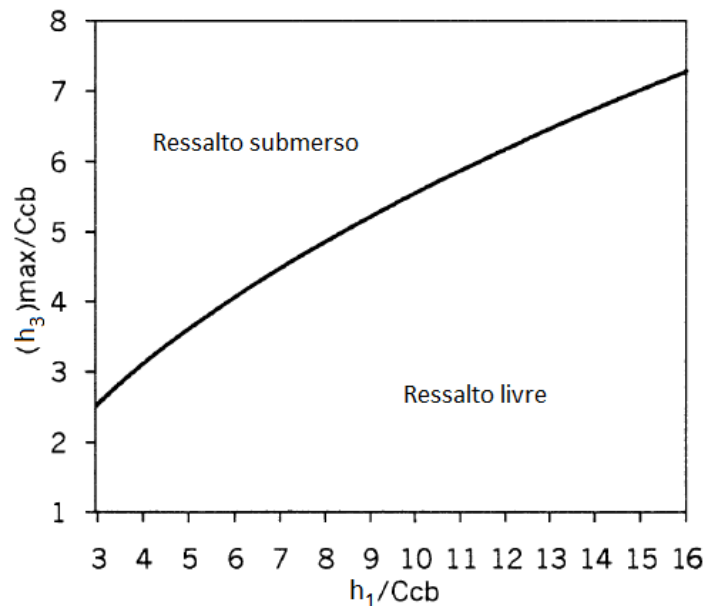


Figura 2.6 - Fronteira teórica obtida pela equação 2.29 (Yen *et al.*, 2001).

<sup>(8)</sup> Por norma, na presente dissertação, o índice max significa máximo.

Nos ensaios realizados por estes investigadores, foi utilizada uma comporta plana vertical e uma comporta plana vertical alterada, com o batente adaptado, a simular uma comporta de segmento. Nos resultados obtidos, foi verificado que o coeficiente de contração na comporta plana vertical variou entre 0,59 e 0,61 e na comporta alterada, variou entre 0,65 e 0,75.

De acordo com Clemmens *et al.* (2003), em comportas de segmento, o  $C_c$  é em grande parte influenciado pelo ângulo da lâmina da comporta com a horizontal. Neste tipo de comporta, a vazão vai ser maior que em comportas planas verticais, tendo capacidade para suportar alturas de água a jusante do ressalto,  $h_3$ , mais elevadas, mantendo o ressalto livre (Lin *et al.*, 2002).

Para o ressalto submerso, Yen *et al.* (2001) referem que a vazão diminui com o aumento da altura  $h_3$ , sendo que, para manter a mesma vazão, a altura  $h_1$  ou a abertura da comporta terá de aumentar.

### 2.3.2 Equações da energia-quantidade de movimento com fator de correção

Investigações recentes baseadas no método *E-M* têm considerado as perdas de energia na comporta através de um fator de correção,  $k$ . Estas perdas podem ter várias origens, tais como a resistência ao escoamento oferecida pelas superfícies de fronteira, os vórtices na zona de recirculação a montante da comporta e a camada turbilhonar que se forma sobre a veia líquida no ressalto hidráulico submerso.

#### 2.3.2.1 Equações de Belaud, Cassan e Baume

Belaud *et al.* (2009) estudaram o coeficiente de contração para as duas situações de ressalto, tendo por base o princípio *E-M* e considerando a pressão exercida na face de montante da comporta. Com a introdução do fator  $k$  ( $\geq 1$ ) na equação de igualdade entre a energia específica de montante e a de jusante da comporta é obtida a equação,

$$h_1 + \frac{Q^2}{2gL^2h_1^2} = h'_2 + k \frac{Q^2}{2gL^2h_2^2} \quad (2.30)$$

Em que, para a secção 2, se considera que a almofada de água sobre a veia líquida apenas influencia a pressão (sem componente cinética).



Para avaliar a variação do coeficiente de contração em cada situação de escoamento, foi considerada a abertura relativa da comporta,  $a$ , e a razão de submersão,  $s$ , obtidas com:

$$a = b/h_1 \quad (2.31)$$

$$s = h'_2/h_1 \quad (2.32)$$

Na equação da razão de submersão é considerado  $h'_2$  com ressalto submerso e  $h_2$  com ressalto livre.

Os autores concluíram que com ressalto livre e submerso associado a pequenas aberturas de comporta ( $a \leq 0,5$ ), o  $C_c$  se mantem perto de 0,61. Para grandes aberturas de comporta ( $a > 0,5$ ) e grande submersão a jusante desta, o coeficiente de contração vai aumentar. Esta situação gera grandes erros entre o caudal medido e o calculado, uma vez que a altura  $h'_2$  é difícil de obter com precisão e porque o coeficiente de contração não se mantem constante.

Belaud *et al.* (2009) determinaram o gráfico da Figura 2.7, de onde se pode obter o valor do coeficiente de contração em função de  $a$  e de  $s$ .

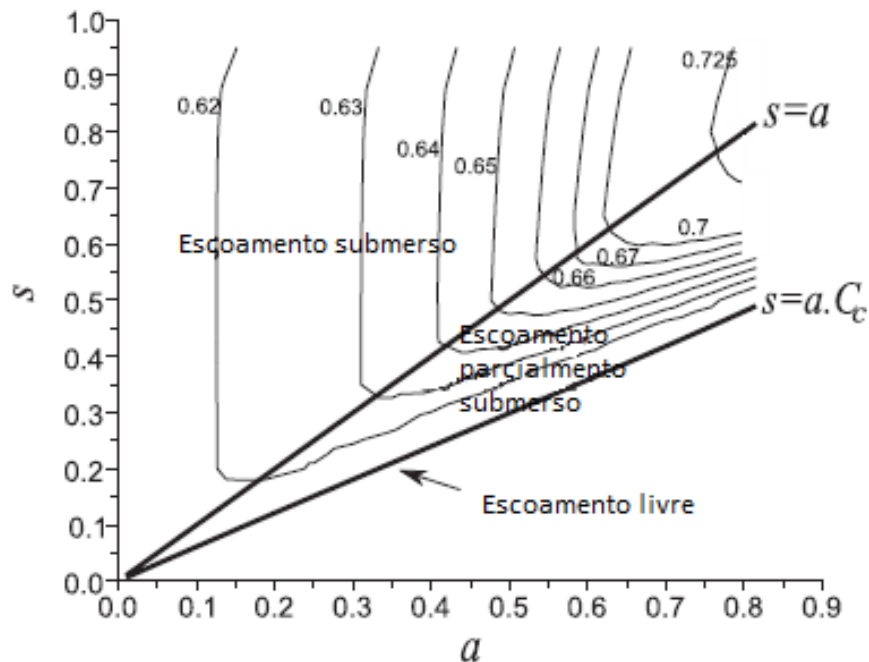


Figura 2.7 - Determinação do coeficiente de contração (Belaud *et al.* 2009).

Na Figura 2.7, é identificada uma área intermédia que representa o escoamento parcialmente submerso. Esta área é atribuída ao escoamento que apresenta a veia líquida contraída submersa, mas não totalmente, ou seja, sem a almofada de água turbilhonar ter atingido a comporta.

Estes investigadores consideraram a seguinte equação:

$$Q = \frac{C_c}{\sqrt{k}} bL \sqrt{2g(h_1 - h'_2)} \quad (2.33)$$

Belaud *et al.* (2009), utilizando um fator  $k = 1.05$ , obtiveram uma boa sobreposição sobre as curvas do diagrama de Henry (1950). Consideram que ainda se têm de realizar ensaios para testar a precisão do método para grandes aberturas de comporta.

### 2.3.2.2 Equações de Habibzadeh, Vatankah e Rajaratnam

Habibzadeh *et al.* (2011) introduziram também um fator de correção,  $k$ , para as perdas de energia na comporta e deduziram teoricamente as equações para calcular o coeficiente de vazão nas situações de ressalto livre e submerso, a partir do método *E-M*. Através da análise de ensaios realizados, determinaram um fator de correção para o escoamento com ressalto livre e outro para o escoamento com ressalto submerso. Apresentaram também uma equação de fronteira, considerando as perdas de energia.

A equação da igualdade das energias específicas, a montante e a jusante da comporta, tomou a seguinte forma:

$$h_1 + \frac{Q^2}{2gL^2h_1^2} = h'_2 + (k + 1) \frac{Q^2}{2gL^2h_2^2} \quad (2.34)$$

A partir da equação 2.34 (tomando  $h'_2 = h_2$ ) é obtida a equação para calcular o coeficiente de vazão na situação de ressalto livre,

$$C_v = C_c \sqrt{\frac{(1 - \eta)}{(1 + k - \eta^2)}} \quad (2.35)$$

Com ressalto submerso, a equação de cálculo do coeficiente de vazão é obtida a partir da equação 2.34 e da equação 2.3 da quantidade de movimento total, obtendo-se,

$$C_v = C_c \cdot \frac{\sqrt{\left[ k\left(\frac{1}{\eta}\right)^2 + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^2 + 2(\lambda - 1) \right] - \sqrt{\left[ k\left(\frac{1}{\eta}\right)^2 + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)^2 + 2(\lambda - 1) \right]^2 - \left[ \left(\frac{1}{\eta}\right)^2 (1+k) - 1 \right]^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right)}}{\frac{1}{\eta}(1+k) - \eta}} \quad (2.36)$$

Em que  $C_c = 0,611$ .

Da análise realizada às perdas de energia na comporta, estes investigadores estabeleceram os valores 0,062 e 0,088 para  $k$ , respetivamente, para ressalto livre e submerso. O facto de as perdas de energia na comporta serem superiores para ressalto submerso deve-se à turbulência sobre a veia líquida contraída.

A equação de fronteira é definida por  $h_{3max}$ . Considerando a equação 2.4 das alturas conjugadas e a equação 2.35 do coeficiente de vazão para ressalto livre é obtida a equação que se segue:

$$h_{3max} = b \times \frac{1}{2} C_c \left[ \sqrt{1 + \frac{16 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)}{(1 + k - \eta^2)} - 1} \right] \quad (2.37)$$

### 2.3.3 Equações de Ferro

Com base no teorema dos *III* da análise dimensional, Ferro (2000) deduziu um método para determinar a vazão em comportas planas verticais, com ressalto livre, tendo calibrado as suas variáveis adimensionais com resultados experimentais. Este estudo foi alargado ao ressalto submerso com Ansar (2001) e Ferro (2001). O método tem sido testado experimentalmente por alguns investigadores (Sepúlveda, 2008; Sepúlveda *et al.*, 2009), concluindo que, se devidamente calibrado, possibilita resultados bastante precisos na obtenção do caudal para ambas as situações de ressalto hidráulico.

Em Ferro (2000), Ansar (2001) e Ferro (2001), foram obtidas as equações que se seguem para determinar as constantes,  $k_i$ , para ressalto livre e submerso:

$$\frac{h_c}{b} = k_0 \left( \frac{h_1}{b} \right)^{k_1} \quad (2.38)$$

$$\frac{h_c}{b} = k'_0 \left( \frac{h_1 - h_3}{b} \right)^{k'_1} \quad (2.39)$$

Em que  $k_0$  e  $k_1$  são constantes a calibrar para ressalto livre e  $k'_0$  e  $k'_1$  são constantes a calibrar para ressalto submerso.

Estas constantes servem para calibrar as equações da vazão e são determinadas através de uma regressão linear dos resultados obtidos experimentalmente em vários ensaios, como se irá apresentar no capítulo seguinte sobre a instalação e metodologia experimentais.

As equações para o cálculo da vazão são obtidas substituindo a altura crítica das equações 2.38 e 2.39 pela equação 2.26 e resolvendo em ordem a  $Q$  vindo, respetivamente, para as situações de ressalto livre e submerso,

$$Q = L \sqrt{g \left[ bk_0 \left( \frac{h_1}{b} \right)^{k_1} \right]^3} \quad (2.40)$$

$$Q = L \sqrt{g \left[ bk'_0 \left( \frac{h_1 - h_3}{b} \right)^{k'_1} \right]^3} \quad (2.41)$$

Os valores das constantes obtidas por Ferro (2000) e Ferro (2001) são apresentados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Constantes obtidas por Ferro (2000 e 2001).**

Ferro (2000)		Ferro (2001)	
$k_0$	$k_1$	$k'_0$	$k'_1$
0,830	0,378	1,0559	0,3344

Em Sepúlveda (2008) e Sepúlveda *et al.* (2009) foram testados diferentes métodos de cálculo para determinar a vazão para comportas planas verticais com ressalto hidráulico submerso. Concluíram que o método de Ferro (2001), tendo as constantes calibradas com os resultados experimentais, é o que apresenta maior precisão relativamente ao caudal medido nos ensaios realizados em canal, com erros na ordem dos 3%. Foram estudadas três comportas planas verticais instaladas ao longo do canal experimental e os valores obtidos para as constantes de cada comporta são apresentados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Constantes obtidas por Sepúlveda (2008).**

	Escoamento com ressalto submerso	
	$k'_0$	$k'_1$
Comporta 1	0,9176	0,3489
Comporta 2	0,9482	0,3202
Comporta 3	1,0097	0,3154

## 3 Instalação e Metodologia Experimentais

### 3.1 Laboratório e instrumentação

O programa experimental foi realizado no canal do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Évora, apresentado na Figura 3.1. Este canal tem secção retangular e declive variável, tendo sido mantida a inclinação nula. O canal foi equipado com uma comporta plana vertical e com um descarregador triangular de soleira delgada.



Figura 3.1 - Canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Évora.

#### 3.1.1 Canal

O canal experimental funciona em circuito fechado. A água é bombada do reservatório para o canal, descarregando esta num tabuleiro, onde se encontra o descarregador triangular que, por sua vez, devolve a água ao reservatório.

A bomba é alimentada por energia elétrica e tem uma válvula manual, que permite regular o caudal a elevar. A capacidade do reservatório é de  $3 m^3$  e o canal experimental tem uma largura de  $0,3 m$ , altura de  $0,465 m$  e comprimento de  $7,5 m$ . O tabuleiro fica instalado sobre o reservatório e tem secção retangular com  $0,6 m$  de largura e  $0,3 m$  de altura. A Figura 3.2 mostra o esquema do canal e acessórios utilizados.

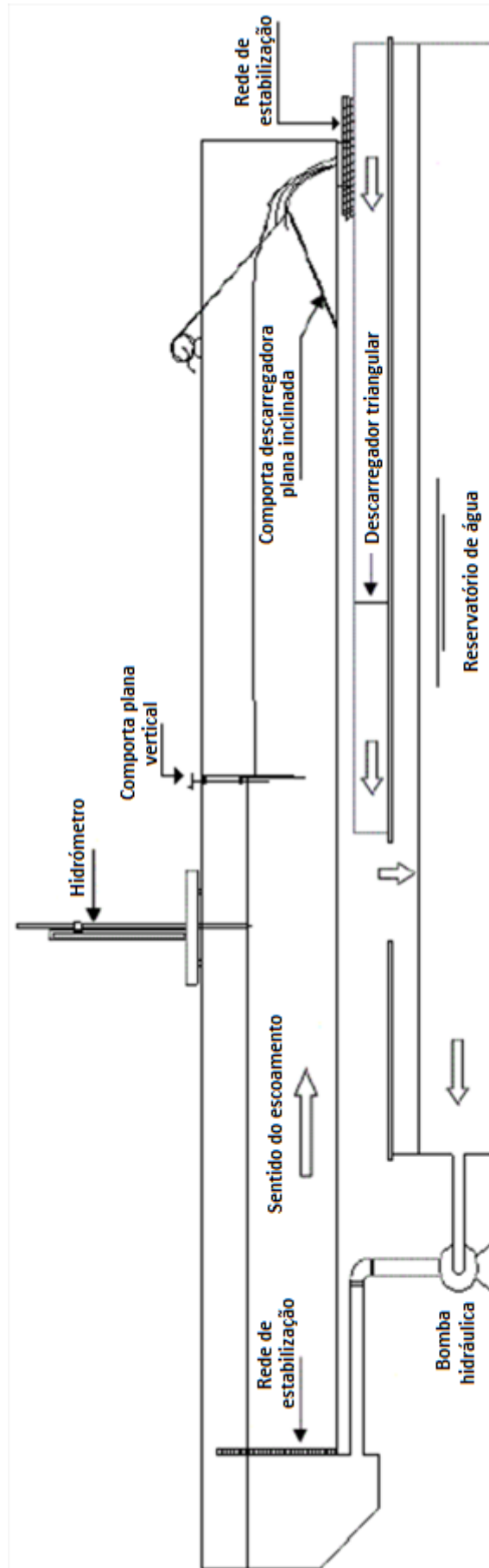


Figura 3.2 - Esquema do canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Évora.

### 3.1.2 Comporta plana vertical

A comporta é do tipo plana vertical e foi instalada sensivelmente a meio do canal. Assim, o escoamento a montante alcança a comporta com pequenas perturbações e, a jusante, o ressalto hidráulico tem espaço para se desenvolver dentro do canal. A comporta tem a mesma largura do canal (sem contração lateral), 0,3 m e é feita de aço, tendo uma placa amovível que se movimenta por manivela associada a um eixo vertical, permitindo regular a abertura desejável. Na Figura 3.3 é apresentada a comporta usada.



Figura 3.3 - Comporta plana vertical utilizada nos ensaios laboratoriais.

#### 3.1.2.1 Limites de aplicação da comporta

Em Bos (1989) são referidos os requisitos que a instalação de comportas planas verticais em canais retangulares deve assegurar, para permitir resultados precisos na determinação do caudal. A comporta utilizada respeitou as dimensões do batente, apresentadas na Figura 3.4.

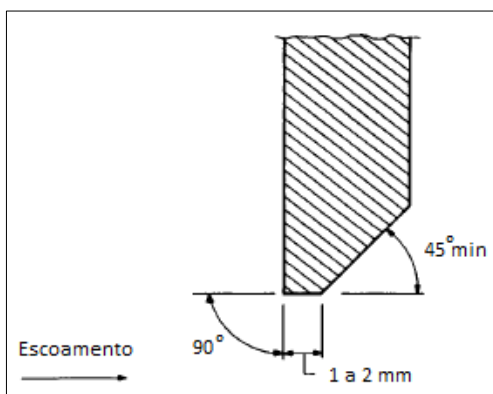


Figura 3.4 - Batente da comporta plana vertical (Bos, 1989).

A comporta utilizada nos ensaios laboratoriais respeitou também as condições seguintes:

- A face de montante ficou instalada exatamente vertical;
- O batente da comporta foi mantido horizontal;
- Os lados do orifício, neste caso as paredes do canal, são verticais.

### 3.1.3 Comporta descarregadora plana inclinada

A comporta descarregadora plana inclinada está instalada na secção de jusante do canal, permitindo regular o nível de água a jusante da comporta plana vertical, possibilitando diferentes graus de submersão para o ressalto hidráulico. Esta comporta é movimentada por ação de uma manivela.

### 3.1.4 Descarregador triangular de soleira delgada

Para medir o caudal dos ensaios realizados foi utilizado o descarregador triangular de soleira delgada que se observa na Figura 3.5.

Os descarregadores são estruturas que têm a função de controlar o escoamento e medir os caudais. Para caudais inferiores a 30 l/s, é aconselhada a utilização do descarregador triangular, pois apresenta maior precisão (Lencastre, 1983). Considera-se que o descarregador tem soleira delgada quando esta apresenta uma espessura reduzida, na ordem de 1 ou 2 milímetros (Lencastre, 1983).

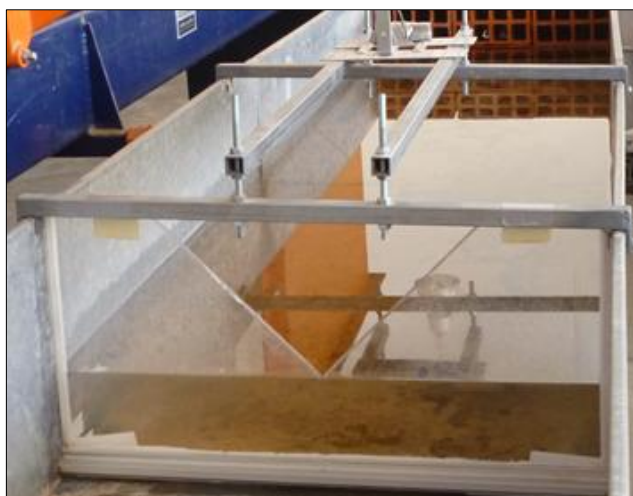
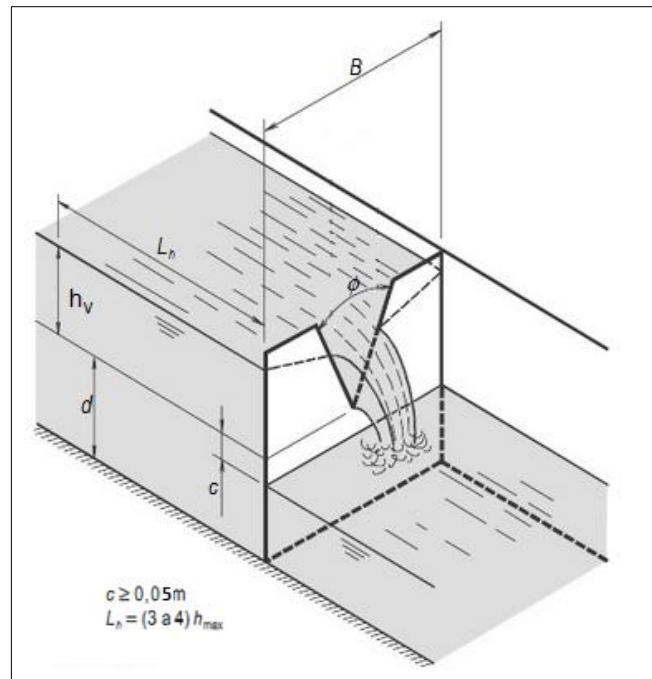


Figura 3.5 - Descarregador triangular utilizado nos ensaios laboratoriais.



Na Figura 3.6 faz-se a representação esquemática de um descarregador triangular de soleira delgada, com a identificação das variáveis a considerar no cálculo do caudal.



**Figura 3.6 - Esquema do descarregador triangular de soleira delgada (Henriques *et al.*, 2007).**

As variáveis representadas na Figura 3.6 são:  $h_v$  – altura de água sobre o vértice do descarregador ( $m$ );  $L_h$  – distância de medição de  $h_v$  ( $m$ );  $B$  – largura do tabuleiro do descarregador ( $m$ );  $\phi$  – ângulo do descarregador triangular (graus);  $d$  – altura desde o rasto do tabuleiro ao vértice do descarregador ( $m$ );  $c$  – altura entre a água a jusante do descarregador e o vértice deste ( $m$ ).

O caudal medido neste tipo de descarregador é obtido através da equação de Kindsvater-Shen (Henriques *et al.*, 2007; USBR, 2001) que segue:

$$Q = C_v \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) (h_v + k_h)^{5/2} \quad (3.1)$$

Em que  $k_h$  é o fator de correção da energia específica no descarregador ( $m$ ).

O coeficiente de vazão é obtido em função de  $h_v/d$ ,  $d/B$  e  $\phi$ . Para o ângulo de  $90^\circ$ , o coeficiente de vazão é determinado pelo diagrama apresentado na Figura 3.7.

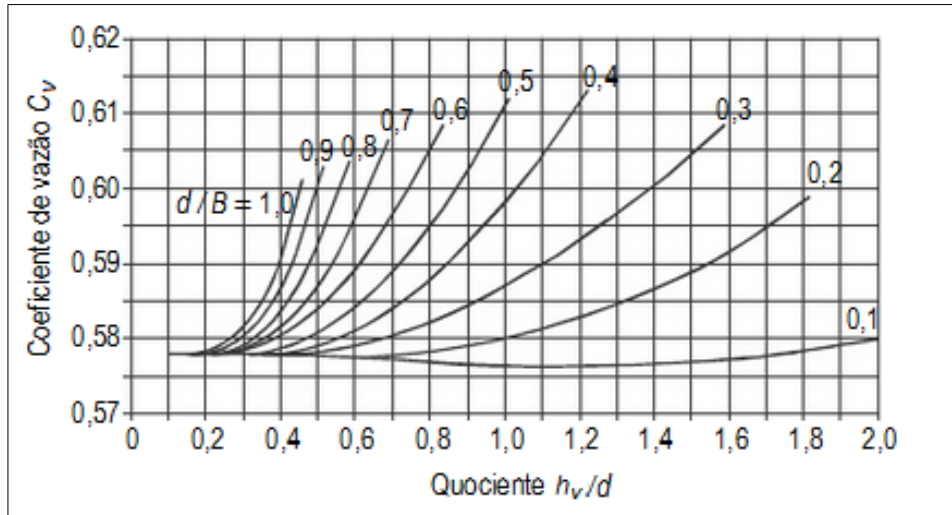


Figura 3.7 - Diagrama do coeficiente de vazão para o descarregador triangular (Henriques *et al.*, 2007).

Na equação 3.1 considera-se  $k_h = 0,00085 m$  (Henriques *et al.*, 2007). Este fator é utilizado para reduzir o erro que resulte de se tomar a carga a montante do descarregador por  $h_v$ .

### 3.1.4.1 Limites de aplicação do descarregador

Apresentam-se os requisitos necessários para o descarregador triangular de soleira delgada possibilitar leituras precisas da altura de água a montante, de acordo com Bos (1989). O descarregador utilizado nos ensaios laboratoriais apresenta-se dentro das dimensões mostradas na Figura 3.8.

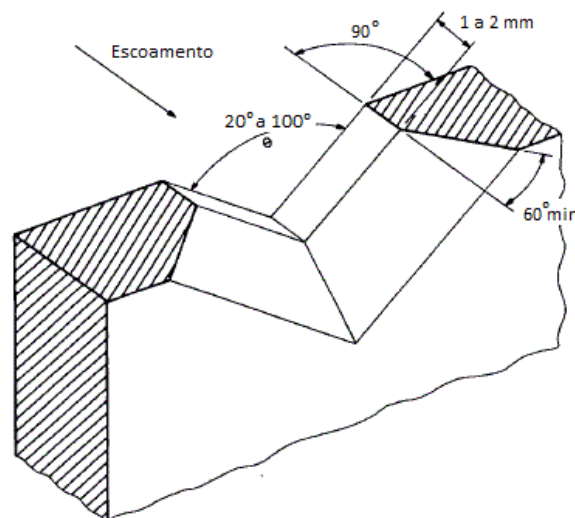


Figura 3.8 - Dimensões da crista do descarregador triangular de soleira delgada (Bos, 1989).

Garantiu-se que o ângulo do descarregador triangular tinha o seu eixo de simetria com a vertical e ficava equidistante de ambos os lados do tabuleiro. De acordo com Bos (1989), o descarregador utilizado no trabalho laboratorial corresponde ao tipo parcialmente contraído. Nesta situação, as contrações dos lados do descarregador não são totalmente desenvolvidas, devido à proximidade das paredes do tabuleiro ou do rasto. Para o tipo parcialmente contraído deve ser usado o ângulo,  $\emptyset = 90^\circ$  e respeitarem-se as condições:

- $h_v/d \leq 1,2$ ;
- $h_v/B \leq 0,4$ ;
- $0,05 < h_v \leq 0,6 \text{ m}$ ;
- Distância do vértice ao rasto,  $d \geq 0,1 \text{ m}$ ;
- Largura do tabuleiro,  $B \geq 0,6 \text{ m}$ ;
- O nível de água a jusante do descarregador deve ser inferior à altura do vértice.

A Tabela 3.1 apresenta os valores registados no descarregador triangular necessários para comprovar os requisitos anteriores.

**Tabela 3.1 - Medias registadas no descarregador triangular.**

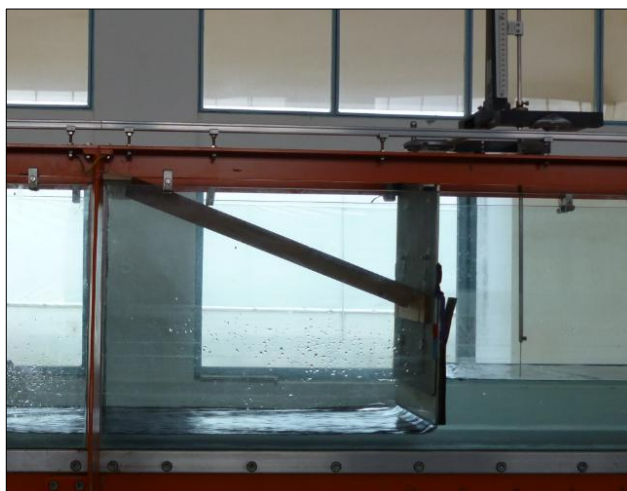
Descarregador triangular com $\emptyset = 90^\circ$	
$h_v$ máximo registado	0,149 (m)
$h_v$ mínimo registado	0,103 (m)
$d$	0,126 (m)
$B$	0,6 (m)

Da Tabela 3.1, pode concluir-se que as medidas registadas estão de acordo com o critério estabelecido em Bos (1989). A jusante do descarregador, o nível de água foi sempre inferior ao seu vértice em todos os ensaios realizados.

### 3.1.5 Instrumentos de medição

As medições foram efetuadas com um hidrómetro de ponta fina, com precisão de 0,1 mm. Para as leituras das alturas de água no canal, o hidrómetro foi posicionado sobre os carris que percorrem a parte superior daquele. No descarregador triangular, o hidrómetro foi apoiado sobre uma armação metálica para permitir efetuar a leitura da altura de água. Todas as medições foram

efetuadas no eixo central do escoamento. Apresenta-se na Figura 3.9 um exemplo de medição realizada nos ensaios, relativa ao registo da altura de água a montante da comporta.



**Figura 3.9 – Medição de altura de água com hidrómetro.**

### **3.2 Adaptações nos equipamentos**

Os equipamentos utilizados no canal experimental tiveram algumas alterações para melhorar a sua funcionalidade.

O sistema de fixação original da comporta plana vertical é feito com base nuns calces, apertados às barras superiores do canal. No entanto, esta comporta teve de ser reforçada com um sistema de barras em madeira, tal como se apresenta na Figura 3.10. Assim, conseguiu-se manter esta estrutura na vertical, uma vez que, com o aumento do caudal a comporta tinha tendência a deslocar-se para a frente, devido à impulsão da água a montante.



**Figura 3.10 - Sistema de reforço aplicado na comporta.**

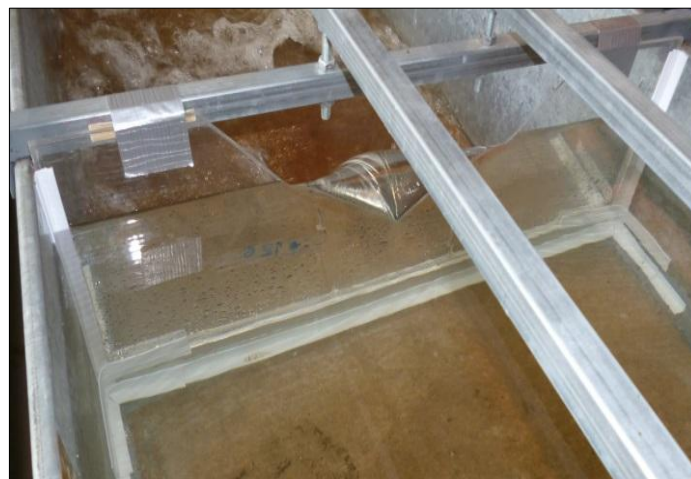
Esta solução de reforço mostrou-se eficaz, mantendo a comporta estabilizada para todos os ensaios realizados, diminuindo o erro provocado nas alturas de água a registar.

No local onde a água proveniente do canal descarrega no tabuleiro é comum haver muita turbulência. Para caudais elevados, esta agitação origina algumas perdas de água por galgamento. Deste modo, optou-se por colocar uma rede sintética dobrada em várias camadas, para estabilizar o escoamento naquele local, diminuindo as perdas de água. A Figura 3.11 apresenta a solução usada, acompanhada de uns tijolos que têm a mesma função de estabilização do escoamento.



**Figura 3.11 - Rede de estabilização do escoamento na descarga para o tabuleiro.**

O descarregador triangular, que fica instalado no tabuleiro onde descarrega a água proveniente do canal, apresentava pouca estanquicidade em todo o perímetro de contacto com o tabuleiro. De forma a eliminar as fugas de água nesta zona de contacto, optou-se por inicialmente isolar todo este limite com silicone para juntas e após a sua secagem procedeu-se ao reforço com fita isoladora impermeável, própria para locais em permanência com água. Com esta intervenção é garantida maior precisão na medição do caudal. A Figura 3.12 apresenta a solução utilizada.



**Figura 3.12 - Isolamento nas juntas de contacto do descarregador com o tabuleiro.**

### 3.3 Procedimento experimental

#### 3.3.1 Medição das alturas de água

A Figura 3.13 representa os dois tipos de ressalto hidráulico, onde estão identificadas as alturas de água a registrar no canal laboratorial.

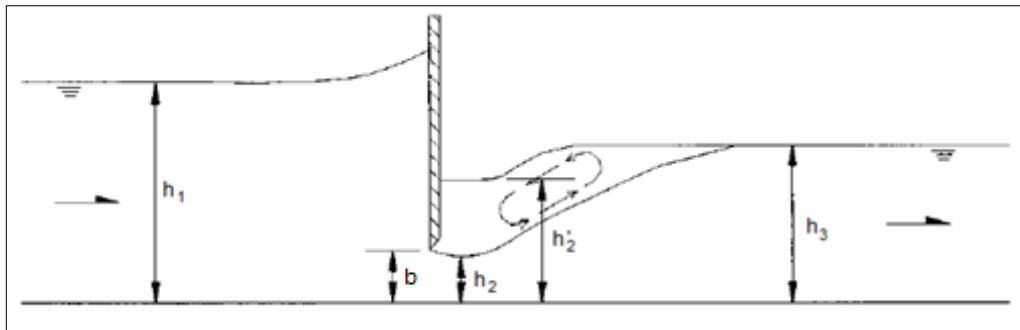


Figura 3.13 - Alturas de água a registrar em canal para ressalto livre e submerso (Lin *et al.*, 2002).

Em cada ensaio, procedeu-se à obtenção das alturas de água em quatro locais distintos. As primeiras três leituras no canal principal –  $h_1$ ,  $h_2$  ou  $h'_2$  e  $h_3$ . A última leitura foi obtida no tabuleiro de descarga, onde se encontra o descarregador triangular –  $h_v$ .

De forma a obter maior rigor nos resultados, foram realizadas 3 leituras em cada local por ensaio, para depois comparar as leituras e descartar algum valor inesperado. Das leituras consideradas em cada ensaio, foi determinado o seu valor médio. Considerou-se um tempo de estabilização do escoamento entre leituras num mesmo local de 10 minutos, que correspondia em média ao tempo que demorava a registar os 4 pontos no escoamento. As leituras em cada local foram registadas da seguinte forma:

- $h_1$  – registada imediatamente a montante da comporta;
- $h_2$  – registada a altura mínima na veia líquida contraída (Lin *et al.*, 2002);
- $h'_2$  – registada imediatamente a jusante da comporta;
- $h_3$  – registada a jusante do ressalto, onde o escoamento apresenta menor turbulência;
- $h_v$  – registada à distância  $L_h$ . (Henriques *et al.*, 2007; Bos 1989).

No caso das alturas  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_v$ , a leitura é fácil, uma vez que o escoamento apresenta a superfície relativamente estável. Já para a obtenção de  $h'_2$ , a superfície fica muito agitada, dificultando a leitura precisa. A altura  $h_3$ , dependendo da intensidade do ressalto, pode também apresentar forte turbulência no local da medição.

### 3.3.2 Ensaios realizados

Os ensaios realizados no canal experimental foram considerados tendo por base o diagrama de Henry (1950). Sobre a área do diagrama foram distribuídos vários pontos para avaliar situações de escoamento diversificadas, tendo como referência os resultados obtidos por Henry (1950). No total foram realizados 23 ensaios, considerando quatro aberturas de comporta, para ressalto livre e submerso.

A Tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos dos ensaios laboratoriais e o caudal calculado através do descarregador triangular.

**Tabela 3.2 - Resultados obtidos dos ensaios laboratoriais.**

N	Comporta plana vertical							Descarregador triangular			
	b (m)	h <sub>1</sub> (m)	h <sub>2</sub> (m)	h' <sub>2</sub> (m)	h <sub>3</sub> (m)	h <sub>1</sub> /b -	h <sub>3</sub> /b -	h <sub>v</sub> (m)	h <sub>v</sub> /d -	C <sub>v</sub> -	Q (m <sup>3</sup> /s)
Ensaios com ressalto livre											
1	0,035	0,0550	0,0217	-	0,0445	1,57	1,27	0,112	0,89	0,580	0,0058
2	0,035	0,0805	0,0204	-	0,0604	2,30	1,73	0,121	0,96	0,581	0,0071
3	0,04	0,0694	0,0255	-	0,0608	1,74	1,52	0,122	0,97	0,581	0,0073
4	0,04	0,0806	0,0248	-	0,0673	2,02	1,68	0,129	1,03	0,582	0,0084
5	0,04	0,0894	0,0224	-	0,0702	2,24	1,75	0,129	1,03	0,582	0,0084
6	0,04	0,0995	0,0244	-	0,0742	2,49	1,86	0,136	1,08	0,582	0,0095
7	0,03	0,2000	0,0180	-	0,0995	6,67	3,32	0,141	1,12	0,583	0,0105
8	0,035	0,1795	0,0200	-	0,1021	5,13	2,92	0,145	1,15	0,584	0,0112
9	0,025	0,3003	0,0152	-	0,1226	12,01	4,91	0,148	1,17	0,584	0,0117
10	0,04	0,1499	0,0326	-	0,1015	3,75	2,54	0,148	1,17	0,584	0,0117
11	0,04	0,1492	0,0241	-	0,0950	3,73	2,38	0,149	1,18	0,584	0,0119
Ensaios com ressalto submerso											
1	0,04	0,1514	-	0,1276	0,1398	3,79	3,50	0,103	0,82	0,579	0,0047
2	0,04	0,0998	-	0,0734	0,0905	2,49	2,26	0,110	0,87	0,580	0,0056
3	0,035	0,2806	-	0,2386	0,2500	8,02	7,14	0,112	0,89	0,580	0,0059
4	0,035	0,1806	-	0,1304	0,1494	5,16	4,27	0,115	0,91	0,580	0,0063
5	0,04	0,0813	-	0,0457	0,0700	2,03	1,75	0,116	0,92	0,580	0,0064
6	0,03	0,2994	-	0,2229	0,2399	9,98	8,00	0,123	0,97	0,581	0,0074
7	0,025	0,3007	-	0,1735	0,1997	12,03	7,99	0,125	1,00	0,581	0,0078
8	0,035	0,1804	-	0,0767	0,1192	5,15	3,41	0,133	1,05	0,582	0,0090
9	0,035	0,2802	-	0,1433	0,1812	8,01	5,18	0,141	1,12	0,583	0,0105
10	0,03	0,3005	-	0,1388	0,1814	10,02	6,05	0,141	1,12	0,583	0,0105
11	0,025	0,3999	-	0,1497	0,2008	16,00	8,03	0,143	1,14	0,583	0,0109
12	0,025	0,3506	-	0,0751	0,1510	14,02	6,04	0,146	1,16	0,584	0,0114



Os ensaios apresentados na Tabela 3.2 foram organizados por ordem crescente de caudal e por situação de ressalto. A partir dos resultados registados para cada ensaio, foi realizada a sobreposição no diagrama de Henry (1950), tal como se apresenta na Figura 3.14, em função de  $h_1/b$  e  $h_3/b$ .

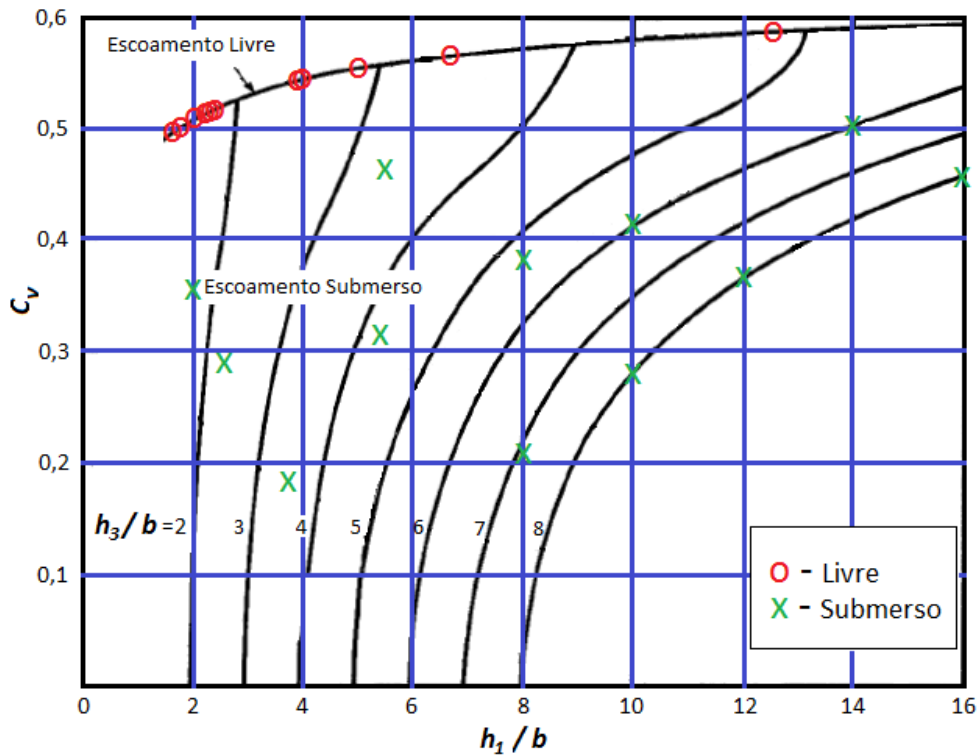


Figura 3.14 - Representação dos ensaios obtidos sobre o diagrama de Henry (1950).

Esta sobreposição permite comparar os valores dos coeficientes de vazão obtidos experimentalmente com aqueles determinados por Henry (1950).

### 3.4 Tratamento de dados

#### 3.4.1 Precisão das medições

Os dados recolhidos experimentalmente são sempre uma aproximação do verdadeiro valor a registar, podendo ser ligeiramente superiores ou inferiores (Bos, 1989). Neste sentido, as medições efetuadas vão ter um erro associado. Os erros podem ser de três tipos, os grosseiros, os aleatórios e os sistemáticos.

Os erros grosseiros podem ser facilmente identificados, uma vez que destoam dos restantes valores medidos e, por isso, devem ser retirados de uma análise estatística. A sua



ocorrência pode ser originada por erros de leitura ou mau funcionamento dos equipamentos de medição.

Os erros aleatórios são originados ocasionalmente por leituras de difícil precisão ou devido às ondulações na superfície do escoamento. O erro médio aleatório deverá diminuir com o aumento do número de medições.

Os erros sistemáticos ocorrem devido a um instrumento de medição não calibrado ou se existe a tendência de anotar sempre os valores medidos por excesso ou por defeito. Logo, assim que haja evidência de que este tipo de erro ocorre, o erro médio deverá ser considerado para validar as medições realizadas.

É fundamental para a precisão das medições efetuadas que a instalação dos equipamentos esteja feita de forma adequada, que exista boa calibração dos instrumentos de medição e fazer boa análise dos resultados, mantendo a inspeção frequente dos equipamentos tendo em atenção cada procedimento (USBR, 2001).

Os resultados gerados pelas equações de cálculo para um determinado caudal têm de ser comparados com o caudal medido, para se poder saber o erro que está associado a cada formulação e, desta forma, encontrar aquela que melhor se adequa aos ensaios realizados. A equação para determinar o erro relativo obtido é dada por:

$$e = \frac{Q_{cal} - Q_{med}}{Q_{med}} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que  $e$  é o erro relativo (%),  $Q_{cal}$  é o caudal calculado ( $m^3/s$ ) e  $Q_{med}$  é o caudal medido pelo descarregador triangular ( $m^3/s$ ).

O erro percentual absoluto médio originado por cada método de cálculo utilizado pode ser obtido pela equação seguinte:

$$e_{am} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{cal} - Q_{med}}{Q_{med}} \right| \quad (3.3)$$

Em que  $e_{am}$  é o erro percentual absoluto médio (%) e  $N$  o número de ensaios realizados.

### 3.4.2 Calibração do método de Ferro

As equações de Ferro requerem calibração prévia das suas constantes para poderem ser utilizadas com maior precisão nos cálculos. Em Sepúlveda (2008), é referido que a calibração deste método pode ser efetuada através de uma regressão linear utilizando o método dos

mínimos quadrados. No entanto, Sepúlveda (2008) reconhece que, utilizar o método *Least Absolute Deviations (LAD)* resulta em menores erros, permitindo obter uma regressão mais aproximada de valores teóricos.

Consideraram-se os métodos anteriormente referidos para o cálculo das constantes dos resultados obtidos experimentalmente. Para tal, foi utilizada uma folha de cálculo *Microsoft Excel* onde se organizaram os resultados das variáveis obtidas experimentalmente, por ordem crescente, tal como se apresenta nas Tabelas 3.3 e 3.4 para cada situação de escoamento.

**Tabela 3.3 - Dados para calibração de Ferro com ressalto livre.**

$h_c/b$	$h_1/b$
0,97	1,57
0,98	1,74
1,08	2,02
1,08	2,24
1,10	2,30
1,17	2,49
1,35	3,75
1,36	3,73
1,49	5,13
1,66	6,67
2,15	12,01

**Tabela 3.4 - Dados para calibração de Ferro com ressalto submerso.**

$h_c/b$	$(h_1 - h_3)/b$
0,73	0,29
0,82	0,23
0,90	0,28
0,97	0,88
1,01	0,89
1,29	1,75
1,31	1,98
1,43	2,83
1,64	4,04
1,67	3,97
2,04	7,96
2,11	7,98

A calibração é realizada graficamente calculando as linhas de tendência dos resultados experimentais apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4. Foram determinadas quatro linhas de tendência, considerando duas formas de cálculo para o método dos mínimos quadrados, o cálculo do método *LAD* e as constantes padrão de Ferro. Para o método dos mínimos quadrados,

recorreu-se a uma linha de tendência potencial gerada automaticamente pelo gráfico de dispersão do *Microsoft Excel*, obtendo as constantes pela equação desta linha, e a outra forma de cálculo para o método dos mínimos quadrados e do método *LAD* foi através da opção *Solver* do *Microsoft Excel*, permitindo obter as constantes para a calibração do método de Ferro.

As linhas de tendência obtidas para a calibração do método de Ferro para escoamento com ressalto livre estão representadas na Figura 3.15 e os valores das constantes gerados por estas linhas são dados na Tabela 3.5.

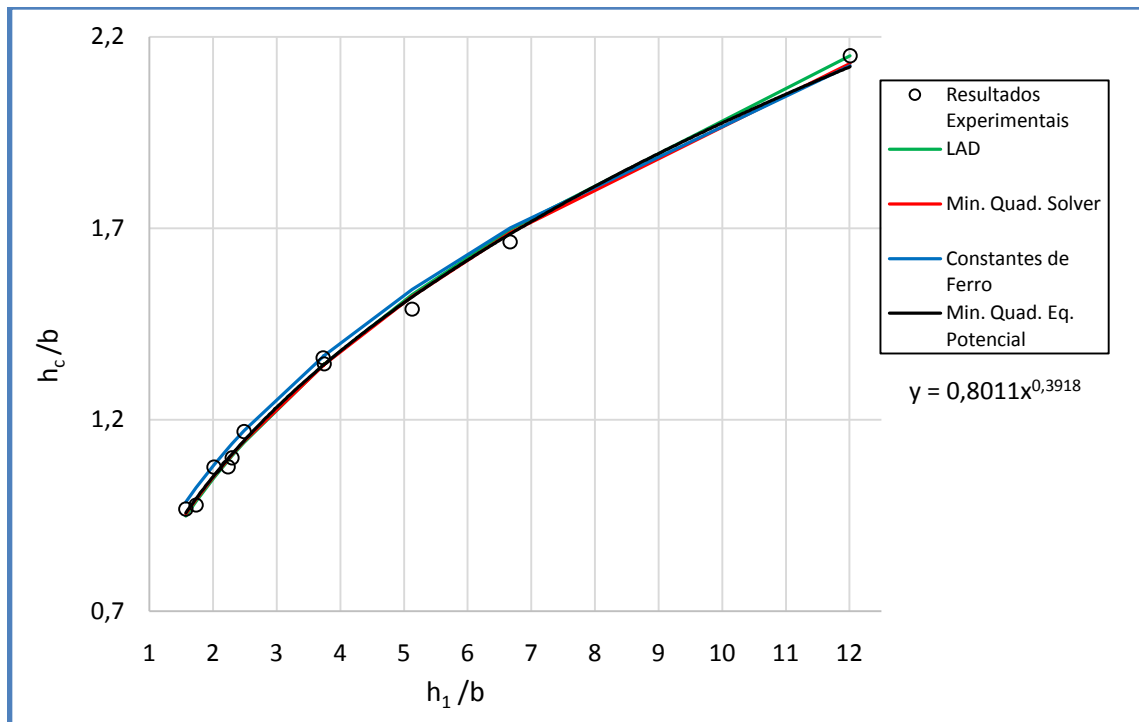


Figura 3.15 - Linhas de tendência para calibrar o método de Ferro para ressalto livre.

Tabela 3.5 - Constantes para a calibração do método de Ferro para ressalto livre.

Métodos de Cálculo	Ressalto livre	
	$k_0$	$k_1$
<i>LAD</i>	0,7904	0,4027
Min. Quadrados Solver	0,7976	0,3952
Constantes de Ferro	0,83	0,378
Min. Quad. Eq. Potencial	0,8011	0,3918

Para escoamento com ressalto submerso, as linhas de tendência obtidas graficamente para calibrar o método de Ferro estão apresentadas na Figura 3.16. A Tabela 3.6 faz o resumo das constantes fornecidas pelas linhas de tendência.

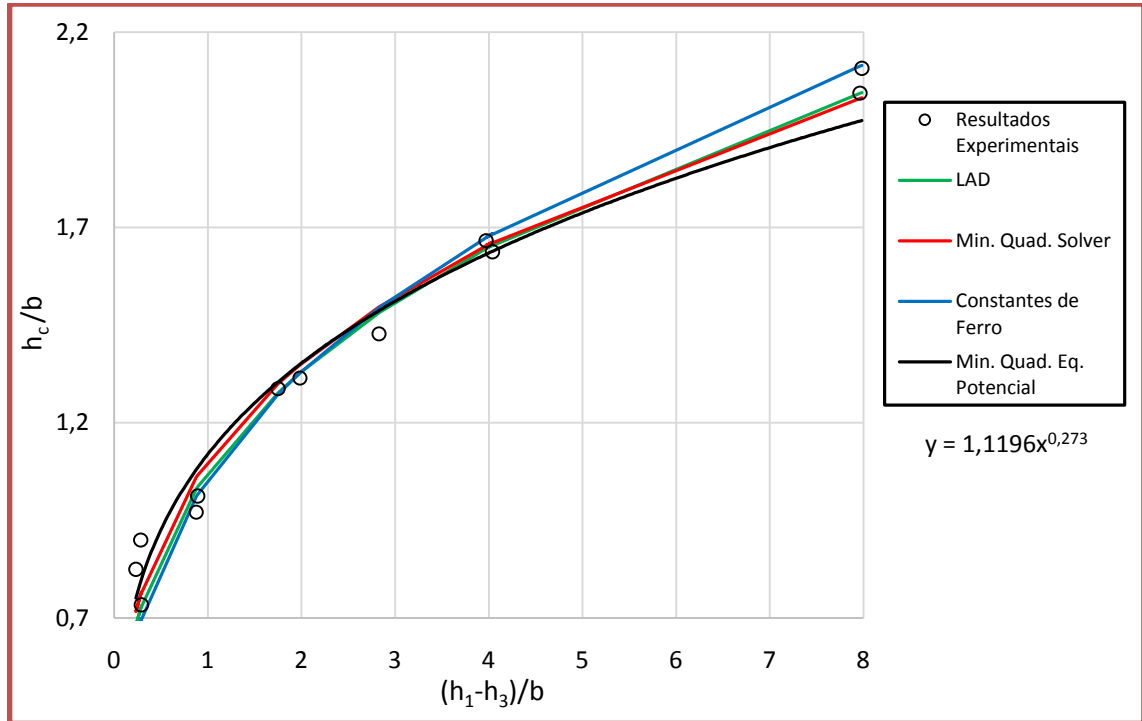


Figura 3.16 - Linhas de tendência para calibrar o método de Ferro para ressalto submerso.

Tabela 3.6 - Constantes para a calibração do método de Ferro para ressalto submerso.

Métodos de Cálculo	Ressalto submerso	
	$k'_0$	$k'_1$
LAD	1,0732	0,3105
Min. Quadrados Solver	1,1025	0,2942
Constantes de Ferro	1,0559	0,3344
Min. Quad. Eq. Potencial	1,1196	0,2730

## 4 Análise de Resultados

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por cada método de cálculo descrito anteriormente. Os diferentes métodos de cálculo considerados foram distribuídos por três grupos, para se compararem os valores de caudal calculados com os resultados obtidos no descarregador triangular. O grupo I engloba os métodos com base nas equações da energia-quantidade de movimento. No grupo II, são apresentados os resultados das equações  $E-M$  com fator de correção, e, o grupo III é referente aos cálculos realizados com as equações de Ferro.

As equações de fronteira são também comparadas entre si, para determinar qual obtém com mais rigor a situação de ressalto, no escoamento em comportas.

### 4.1 Comparação entre caudais calculados e medidos

#### 4.1.1 Escoamento com ressalto hidráulico livre

O gráfico representado na Figura 4.1 faz a comparação dos valores de caudal calculados pelas equações do grupo I com os valores de caudal medidos em cada ensaio realizado.

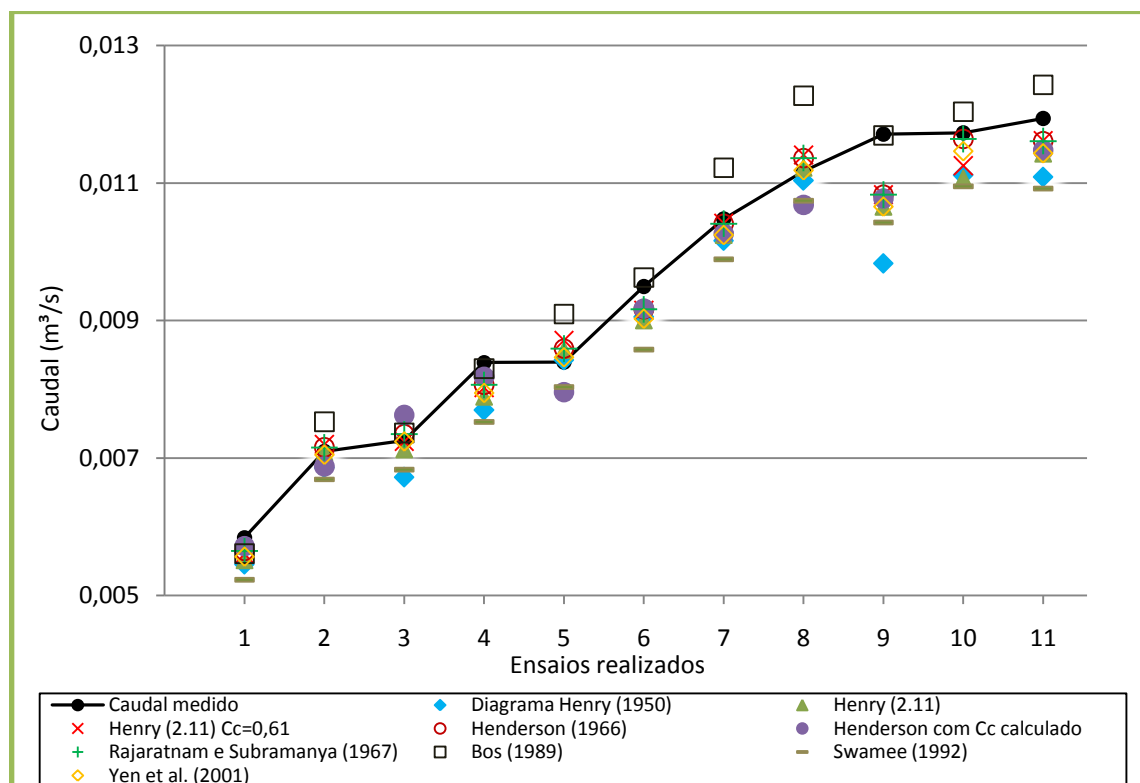


Figura 4.1 - Comparação das equações do grupo I com o caudal medido na situação de resalto livre.

Pela análise da Figura 4.1, é possível observar que, no geral, os valores de vazão calculados estão próximos dos valores medidos no descarregador triangular. Nota-se a tendência para os valores calculados serem inferiores aos medidos, à exceção do cálculo de Bos (1989).

No ensaio número 9, a maioria dos métodos de cálculo apresentam resultados mais afastados do valor medido que nos restantes ensaios realizados. Da análise dos resultados experimentais da Tabela 3.2, conclui-se que este ensaio é o que tem a maior relação  $h_1/b$ , podendo ser esta a origem da discrepância de valores.

Os métodos que forneceram resultados mais afastados dos valores medidos foram o diagrama de Henry (1950), o Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) e o Henderson (1966) com o coeficiente de contração calculado por ensaio. Este último método não é dado nas equações de Henderson (1966), uma vez que consideram  $C_c = 0,61$ . Tomou-se este critério para perceber como o cálculo de  $C_c$ , tendo em conta a relação  $h_2/b$ , podia influenciar os resultados. Conclui-se que o valor de  $C_c$  constante dá origem a resultados mais precisos no cálculo da vazão.

O diagrama de Henry (1950) é mais suscetível de originar erros de cálculo, uma vez que os valores do coeficiente da vazão são obtidos graficamente, o que pode originar erros na leitura do valor e, o método de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) sendo baseado neste diagrama, também seria de esperar que a precisão fosse inferior à de outros métodos de cálculo.

Na Figura 4.2, são apresentados os resultados das equações do grupo II comparados com o caudal medido.

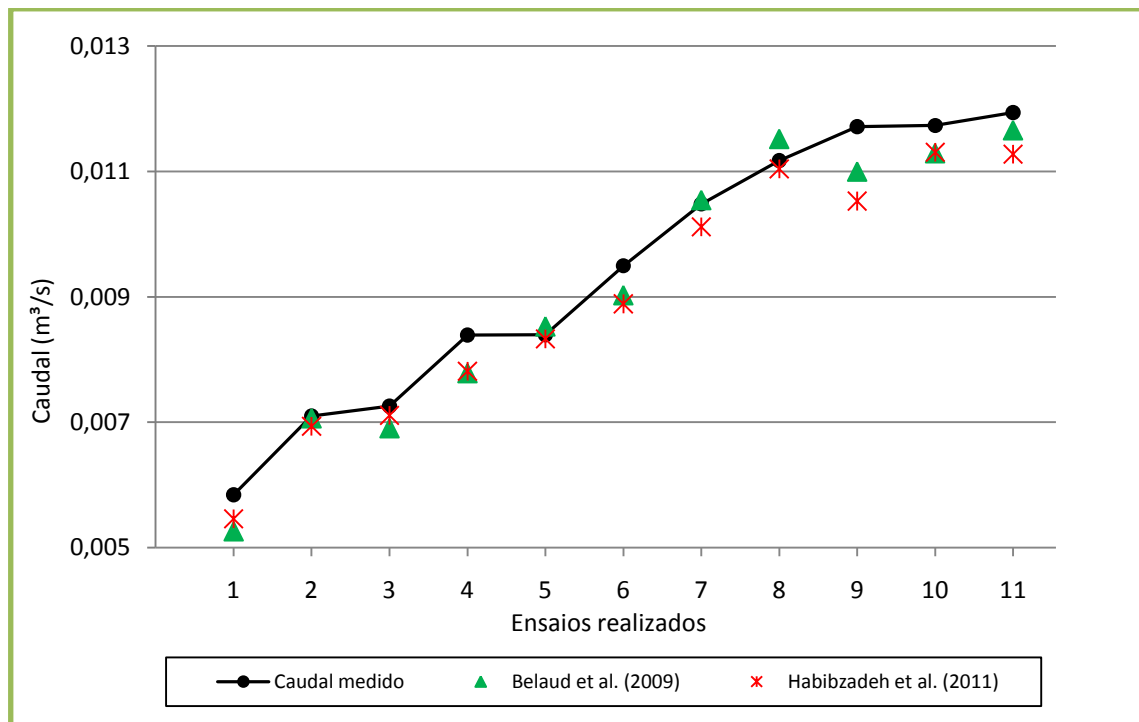


Figura 4.2 - Comparação das equações do grupo II com o caudal medido na situação de ressalto livre.

Neste grupo, foram comparadas as equações que consideram o fator de correção  $k$  na sua formulação. Em ambos os métodos aplicados, os resultados da vazão foram bastante próximos dos medidos no descarregador triangular. Curiosamente, os valores calculados a partir de Belaud *et al.* (2009) foram muito precisos, apesar de os valores do coeficiente de contração serem obtidos graficamente.

As equações do grupo III, baseadas no método de Ferro, têm os seus resultados apresentados na Figura 4.3.

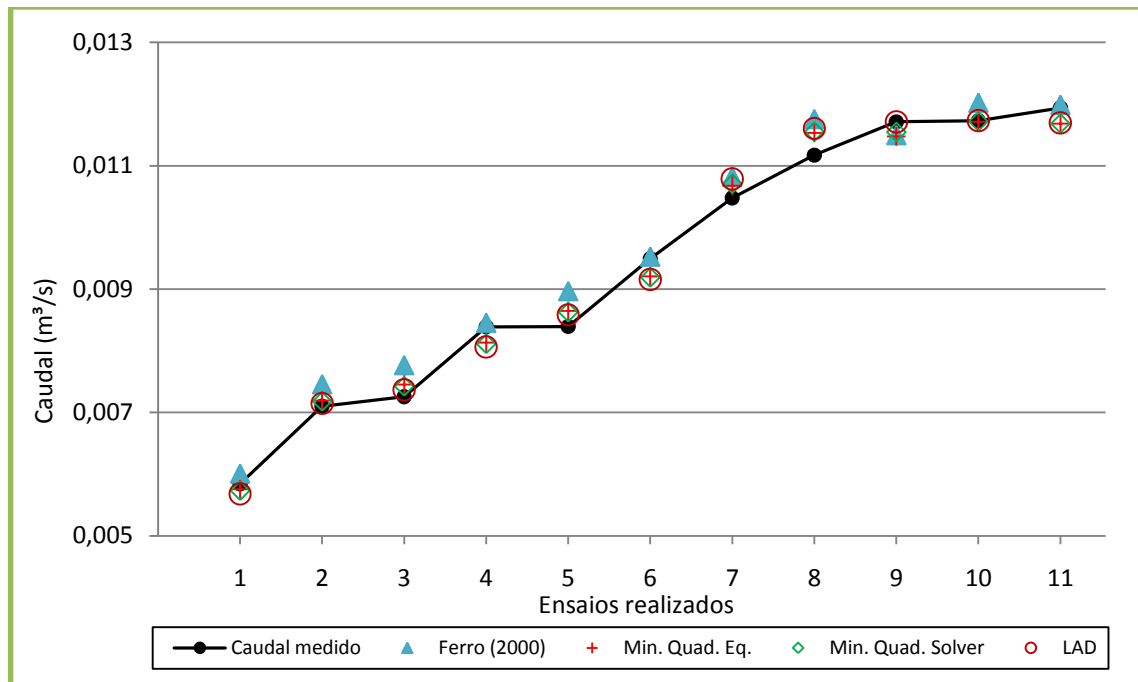


Figura 4.3 - Comparação das equações do grupo III com o caudal medido na situação de ressalto livre.

Os valores obtidos pelas equações do grupo III foram os mais aproximados dos resultados de vazão medidos. Pelo gráfico da Figura 4.3, pode identificar-se que os valores com a calibração de Ferro (2000) estão ligeiramente mais afastados dos resultados medidos, o que se justifica dado que estas constantes foram calibradas com diferentes resultados. Já os restantes métodos de calibração apresentam resultados bastante próximos.

Nos primeiros dois grupos de equações estudados é observado, no ensaio número 9, um maior afastamento entre a vazão calculada pelos diferentes métodos e a vazão medida. No entanto, com as equações de Ferro, os valores calculados foram muito precisos para este ensaio. Conforme já assinalado, este ensaio tem a maior relação  $h_1/b$ , e na determinação das curvas de tendência da Figura 3.14, estando este valor isolado no final das curvas, percebe-se que pode ser esta a causa da precisão obtida neste valor. Esta situação seria melhor compreendida, havendo disponíveis mais resultados próximos desta relação  $h_1/b$ .

#### 4.1.2 Escoamento com ressalto hidráulico submerso

Nesta secção, são comparados os valores de vazão calculados para o escoamento com ressalto submerso, com os caudais medidos no descarregador triangular em cada ensaio. Na Figura 4.4, apresentam-se os caudais calculados com as equações do grupo I comparadas com os valores de caudal medidos.

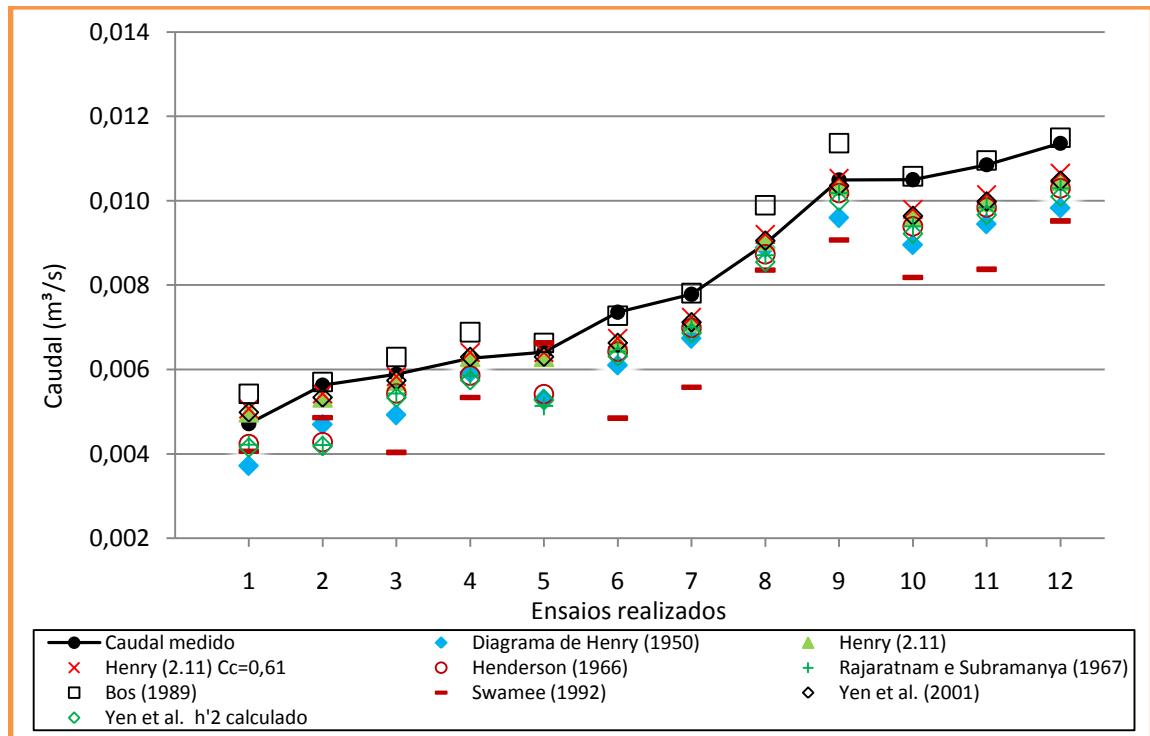


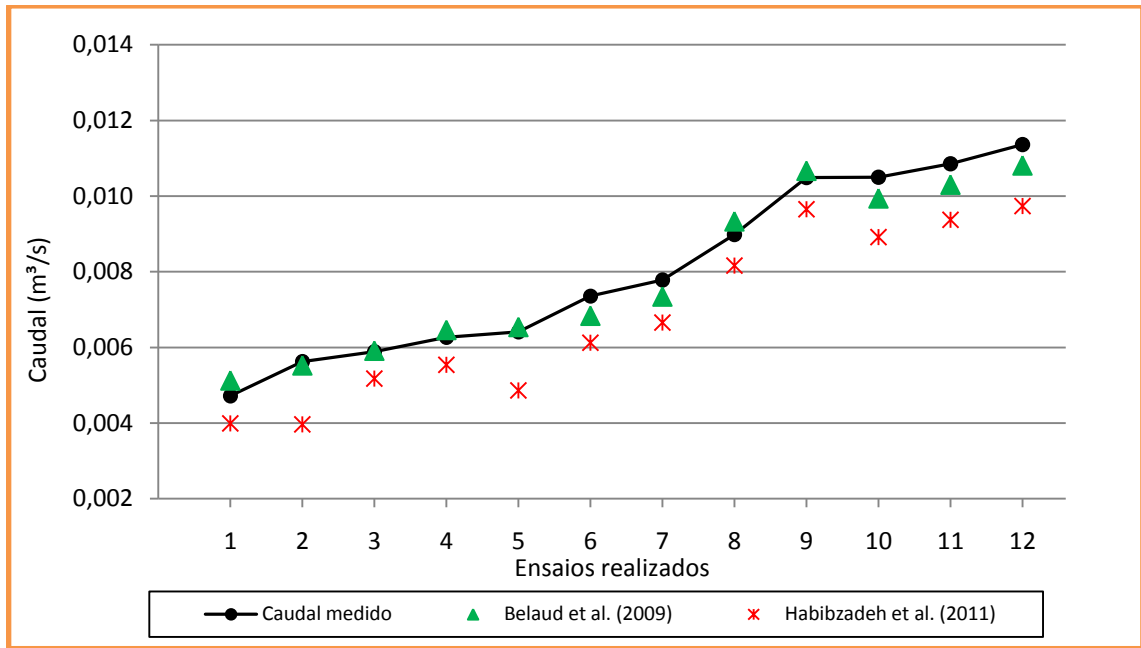
Figura 4.4 - Comparação das equações do grupo I com o caudal medido na situação de ressalto submerso.

Os cálculos realizados com ressalto submerso pelos vários métodos baseados nas equações da energia-quantidade de movimento, à semelhança dos cálculos efetuados com ressalto livre, apresentaram por norma, valores de cálculo inferiores aos medidos experimentalmente. O método de Bos (1989) continua a gerar valores ligeiramente superiores aos medidos.

Os resultados obtidos pelos vários métodos de cálculo apresentam-se mais afastados dos resultados medidos no descarregador, quando comparados aos gráficos anteriores para ressalto livre, prevalecendo a menor precisão nos métodos do diagrama de Henry (1950) e de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009). O coeficiente de vazão gerado pela equação 2.11 de Henry (1950) proporciona grande precisão no cálculo do caudal, bem como as formulações de Bos (1989) e Yen *et al.* (2001).

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados das equações do grupo II para o ressalto submerso.

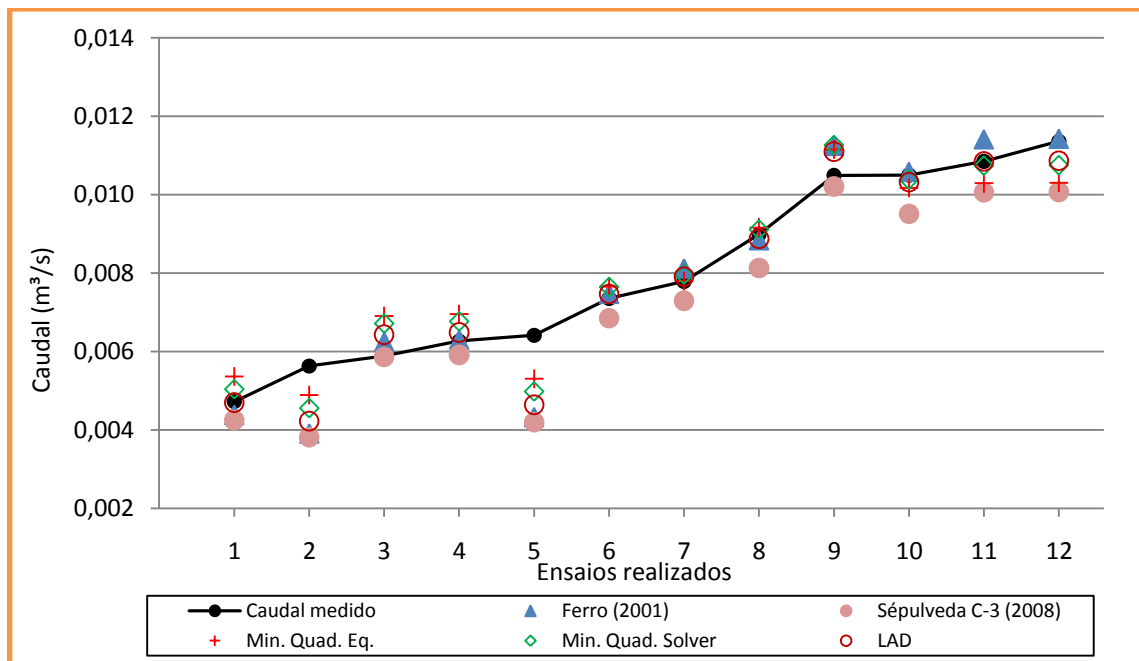




**Figura 4.5 - Comparação das equações do grupo II com o caudal medido na situação de ressalto submerso.**

As equações do grupo II, que consideram um fator de correção na sua formulação, demonstram que o método de Belaud *et al.* (2009) tem resultados muito próximos dos medidos (Figura 4.5). O método de Habibzadeh *et al.* (2011) já apresenta valores um pouco afastados daqueles medidos no descarregador triangular.

Na Figura 4.6, são mostrados os resultados dados pelas equações do grupo III.



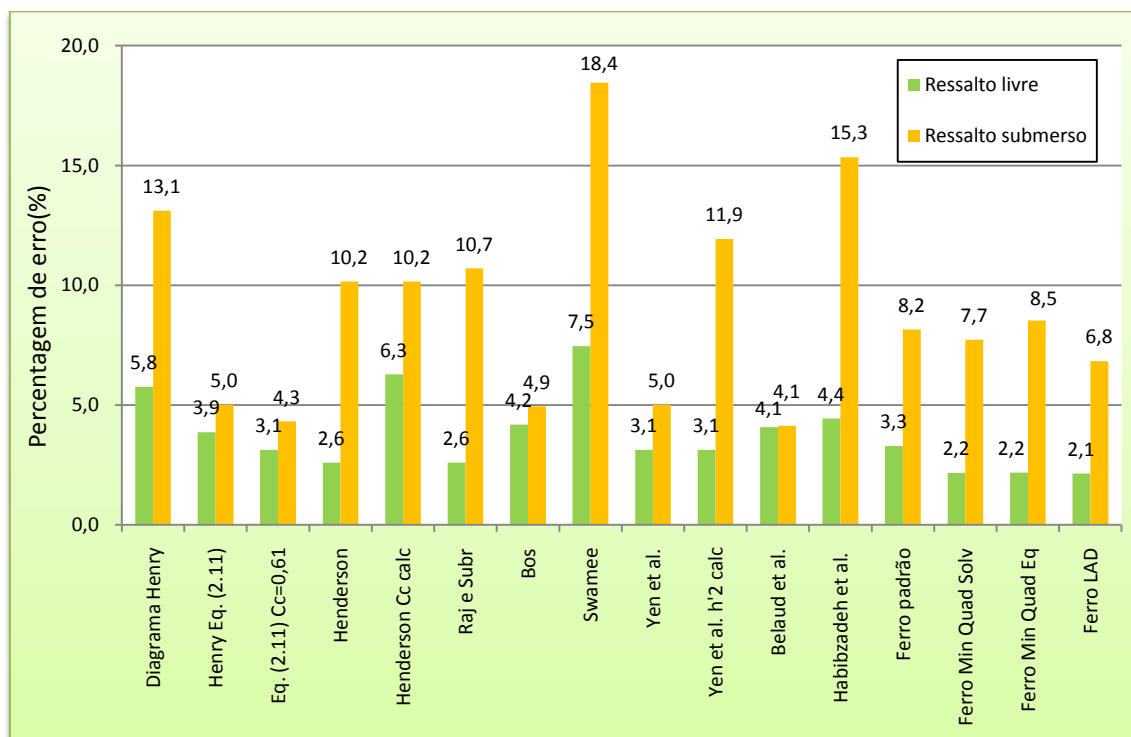
**Figura 4.6 - Comparação das equações do grupo III com o caudal medido na situação de ressalto submerso.**

De entre as formas de calibração consideradas que se apresentam na Figura 4.6, o LAD é o que apresenta valores mais precisos. Já as equações calibradas com as constantes de Ferro (2001) e com a comporta nº 3 de Sepúlveda (2008) são as menos precisas. Na Figura 4.6 observa-se que, nos ensaios 2 e 5, as equações obtiveram valores mais afastados dos medidos no descarregador. Esta situação é discutida seguidamente na análise dos erros obtidos por cada método de cálculo.

## 4.2 Erro gerado pelos métodos de cálculo

### 4.2.1 Erro percentual absoluto médio

Aplicando a equação 3.3, fez-se a comparação do erro percentual absoluto médio para cada método de cálculo. Na Figura 4.7, são apresentados os resultados obtidos para ressalto livre e submerso.



**Figura 4.7 - Erro percentual absoluto médio para os diferentes métodos de cálculo nas situações de ressalto livre e submerso.**

Da análise da Figura 4.7, avaliando as várias formulações de cálculo é obtido um erro médio geral de 4% para escoamento com ressalto livre e um erro médio geral de 9% para o escoamento com ressalto submerso. A diferença de precisão entre os dois tipos de ressalto é evidente, revelando que a determinação da vazão com ressalto livre é a mais precisa, o que está de acordo com Sepúlveda *et al.* (2009) e Clemmens *et al.* (2003). É referido em Clemmens *et al.* (2003) que,

para comportas de segmento, os erros de medição do caudal com ressalto livre rondam os 5%, já com ressalto submerso os erros podem ir até aos 50%.

Enquanto os erros percentuais absolutos médios gerados com ressalto livre variam menos de método para método, os erros percentuais absolutos médios obtidos pelas equações com ressalto submerso variam muito mais, havendo uma maior dispersão em torno da média.

Os resultados apresentados na Figura 4.7 vão ser analisados nos três grupos considerados anteriormente, de forma a facilitar a leitura dos resultados obtidos.

#### **4.2.1.1 Análise de resultados das equações do grupo I**

Pela análise dos resultados com base no diagrama de Henry (1950), o erro percentual absoluto médio para ressalto submerso de 13% é justificado devido à dificuldade em conseguir precisar o valor do coeficiente de vazão porque, como já referido, pequenas variações neste coeficiente originam grande diferença na vazão calculada. Com o ressalto livre, o erro percentual absoluto médio do diagrama de Henry é de cerca de 6%.

Aplicando a equação 2.11 de Henry (1950), os resultados obtidos foram bastante próximos dos medidos no descarregador triangular. Como esta equação originalmente utiliza o coeficiente de contração igual a 0,60, experimentou-se utilizar a mesma equação com o  $C_c = 0,61$ , valor considerado por vários investigadores, para avaliar o seu desempenho. Concluiu-se que com este último coeficiente de contração, a equação 2.11 proporciona resultados ainda mais precisos.

A equação 2.12 de Henry não foi considerada, uma vez que apenas apresentou valores próximos dos medidos para elevados graus de submersão do ressalto.

As equações de Henderson (1966) para o escoamento com ressalto livre forneceram resultados muito precisos, já para escoamento com ressalto submerso, o erro percentual absoluto médio obtido foi superior à média dos métodos considerados. Conforme anteriormente comentado, considerou-se o cálculo de  $C_c$  em cada ensaio com ressalto livre, com a formulação de Henderson (1966), mostrando os resultados que o erro gerado é superior aquele que se obtém considerando este coeficiente com valor constante.

As equações de Rajaratnam e Subramanya (1967) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009), à semelhança de Henderson (1966), dão resultados com baixo erro para ressalto livre, mas, para ressalto submerso, o erro é superior à média.

As equações de Bos (1989) deram resultados muito próximos dos medidos, para ambas as situações de escoamento, com erro percentual absoluto médio inferior a 5%.

Os resultados fornecidos pelas equações de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) foram os que originaram maior erro percentual absoluto médio, tanto para escoamento com ressalto livre como para ressalto submerso. Esta situação já tinha sido comentada, porque este método é baseado no diagrama de Henry (1950) que, por si só, já origina um erro maior que a média dos cálculos considerados. A pouca precisão obtida pelas fórmulas de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) foi também referida em Sepulveda *et al.* (2009), Belaud *et al.* (2009) e Habibzadeh *et al.* (2011).

No método de cálculo de vazão proposto por Yen *et al.* (2001), para ressalto livre o erro percentual absoluto médio é pequeno, na ordem dos 3%. No cálculo da vazão para ressalto submerso foi considerado o método sugerido por estes investigadores, que considera a equação (2.28) para o cálculo da altura submersa,  $h'_2$ , e optou-se também por introduzir a altura submersa medida nos ensaios, para assim comparar os resultados obtidos. Desta forma, concluiu-se que o método original forneceu erros bastante mais elevados, que quando se introduz a altura submersa medida em cada ensaio. A equação (2.28) deu um erro percentual absoluto médio de 10,6% em comparação com o valor medido de  $h'_2$ .

#### **4.2.1.2 Análise de resultados das equações do grupo II**

Os resultados do método de Belaud *et al.* (2009) são muito precisos em ambas as situações de ressalto, com um erro percentual absoluto médio de cerca de 4%. A equação (2.33) para calcular o caudal, proposta por estes investigadores, considera um fator de correção  $k$  que tem de ser maior ou igual à unidade e serve para corrigir as perdas de energia na comporta, como anteriormente referido. No entanto, nos cálculos realizados na presente dissertação concluiu-se que, utilizando  $k=1$ , se conseguiam os resultados com maior precisão. Em canais protótipos, com caudais superiores aos estudados, este coeficiente poderá ser uma mais-valia para calibrar a equação da vazão, uma vez que as perdas de energia aí serão superiores às ocorridas em laboratório.

As equações apresentadas em Habibzadeh *et al.* (2011) foram consideradas neste estudo para o cálculo da vazão, tendo dado bons resultados para ressalto livre. No entanto, para o ressalto submerso, o erro percentual absoluto médio foi elevado, cerca de 15%. Possivelmente, uma das causas do erro para ressalto submerso, está relacionado com o facto de este método considerar coeficientes de correção calibrados em diferentes condições laboratoriais.

#### 4.2.1.3 Análise de resultados das equações do grupo III

As equações baseadas no método de Ferro, calibradas com os resultados experimentais, proporcionaram valores muito próximos entre si. Mesmo utilizando as constantes padrão, o que se pode justificar devido a condições experimentais semelhantes, porque em Sepúlveda *et al.* (2009), é referido que as constantes padrão aumentaram muito o erro. Com ressalto livre, o erro percentual absoluto médio obtido pelas equações de Ferro foi o menor de todos os métodos, com erros próximos dos 2%. No entanto, para o ressalto submerso o erro percentual absoluto médio aumentou devido aos dois ensaios assinalados anteriormente. Dentre as formas de calibração consideradas, a que proporcionou valores mais precisos foi *LAD*.

Na revisão bibliográfica foram referidas as constantes obtidas em Sepúlveda (2008), para as três comportas estudadas. E estas foram testadas neste trabalho e o conjunto de constantes que gerou menor erro foi o da comporta 3. Estes dados são mostrados na comparação do caudal obtido com as equações de Ferro com o medido e não foram apresentados na Figura 4.7 porque Sepúlveda (2008) apenas fez o estudo para o escoamento com ressalto submerso e também porque os resultados obtidos foram menos precisos (erro percentual absoluto médio de 11%) que os das outras calibrações consideradas com o método de Ferro.

Em Sepúlveda *et al.* (2009), é referido que cada comporta é única e, desta forma, as constantes para fazer a sua calibração são diferentes. Isto explica porque os resultados experimentais de Sepúlveda (2008), tendo três comportas iguais a funcionar nas mesmas condições, proporcionaram constantes de calibração diferentes.

Sepúlveda (2008) obteve um erro percentual absoluto médio de 3% com ressalto submerso, utilizando as equações de Ferro calibradas com o método *LAD*, aplicado aos seus resultados experimentais. Nesta dissertação, confirmou-se esta afirmação, aplicando o mesmo método de cálculo aos resultados experimentais deste investigador.

Tendo em conta a precisão dos cálculos obtidos com o método de Ferro em Sepúlveda (2008), procurou-se perceber o que originou os dois valores de cálculo mais afastados, apresentados na Figura 4.6.

Em Bijankhan *et al.* (2012), é referido que o método de Ferro tem boa precisão na situação de ressalto livre, mas para ressalto submerso, em particular com baixa submersão, este método apresenta menor precisão de cálculo. Estes investigadores definem o tipo de submersão como alta ou baixa tendo em conta a relação:  $S^* = 100 \times (h_3 - h_{3_{max}}) / h_{3_{max}}$ , em que  $h_{3_{max}}$  é a equação de fronteira determinada por Habibzadeh *et al.* (2011) pela equação 2.37. A submersão é baixa se  $0 \leq S^* < 20$  e é alta se  $S^* \geq 20$ .

Tal como salientam Bijankhan *et al.* (2012), nesta dissertação procedeu-se à análise dos resultados experimentais de Sepúlveda (2008) relativamente ao critério de submersão apontado anteriormente e confirmou-se que, praticamente todos os ensaios de Sepúlveda (2008), ocorrem em alta submersão. Desta forma, considera-se que um grupo de resultados mais alargados deste investigador, que contemplassem a baixa submersão, seria fundamental para avaliar esta situação.

Bijankhan *et al.* (2012) desenvolvem no seu trabalho um método de cálculo designado por *Discharge Reduction Factor (DRF)*, afirmando que é eficaz na determinação da vazão para ressalto livre e submerso, incluindo a baixa submersão. No entanto, este método não foi considerado no presente estudo, uma vez que, não se determinou o seu funcionamento, que envolve a calibração de vários parâmetros.

De forma a compreender se o critério de submersão dado em Bijankhan *et al.* (2012) é válido para a calibração *LAD* realizada aos resultados experimentais desta dissertação, apresenta-se a Tabela 4.1, que relaciona os valores do erro relativo obtidos com o método de Ferro calibrado com *LAD* para cada ensaio com ressalto submerso, avaliando a influência do tipo de submersão,  $S^*$ , e da abertura relativa de comporta,  $a$ .

**Tabela 4.1 - Avaliação dos erros relativos para ressalto submerso calibrados com *LAD*.**

Ensaio	Erro <i>LAD</i> (%)	$S^*$	$a$
1	0,5	42,8	0,26
2	25,0	21,7	0,40
3	9,2	85,7	0,12
4	3,5	43,9	0,19
5	27,6	8,7	0,49
6	1,5	83,6	0,10
7	1,6	65,2	0,08
8	1,2	14,9	0,19
9	5,8	34,8	0,12
10	1,7	38,5	0,10
11	0,0	42,0	0,06
12	4,4	14,7	0,07

Os ensaios que geraram maior erro relativo com ressalto submerso, aplicando o método de Ferro calibrado com *LAD*, foram o 2 e o 5, com 25 % e 27,6 % de erro, respetivamente.

Tendo em conta o critério de baixa submersão ( $0 \leq S^* < 20$ ), na Tabela 4.1 pode ser identificado que existem 3 ensaios nestas condições, respetivamente o 5, 8 e 12, sendo o ensaio 2 também bastante próximo deste critério. Logo, apesar de os ensaios que geram maiores erros

estarem próximos ou dentro do critério de baixa submersão, existem outros dois ensaios que se incluem nesta situação, mas que tiveram um erro relativo muito reduzido. Neste sentido, não se conseguem tirar conclusões quanto à eficiência deste conceito. Percebeu-se no entanto que, os cálculos com *LAD* que apresentam maior erro relativo estão próximos dos valores de grande abertura de comporta ( $a > 0,5$ ).

A partir da análise realizada ao método de Ferro, pode concluir-se que, o método apresenta muito boa precisão para escoamento com ressalto livre e que, para ressalto submerso com valores próximos das grandes aberturas de comporta, ainda tem de ser aperfeiçoado, requerendo para tal mais ensaios realizados nessas condições, para se conseguir encontrar um método capaz de calibrar com precisão o escoamento continuamente em todos os tipos de submersão.

O método de Ferro tem a mais-valia de não utilizar o valor da altura de água a montante do ressalto hidráulico submerso,  $h'_2$ , na sua formulação, uma vez que este valor é de difícil precisão, por isso possibilita melhores resultados.

#### 4.2.2 Erro percentual absoluto médio obtido de cada método de cálculo

Na Figura 4.8, é apresentado o gráfico com os valores de erro percentual absoluto médio obtido por cada método de cálculo.

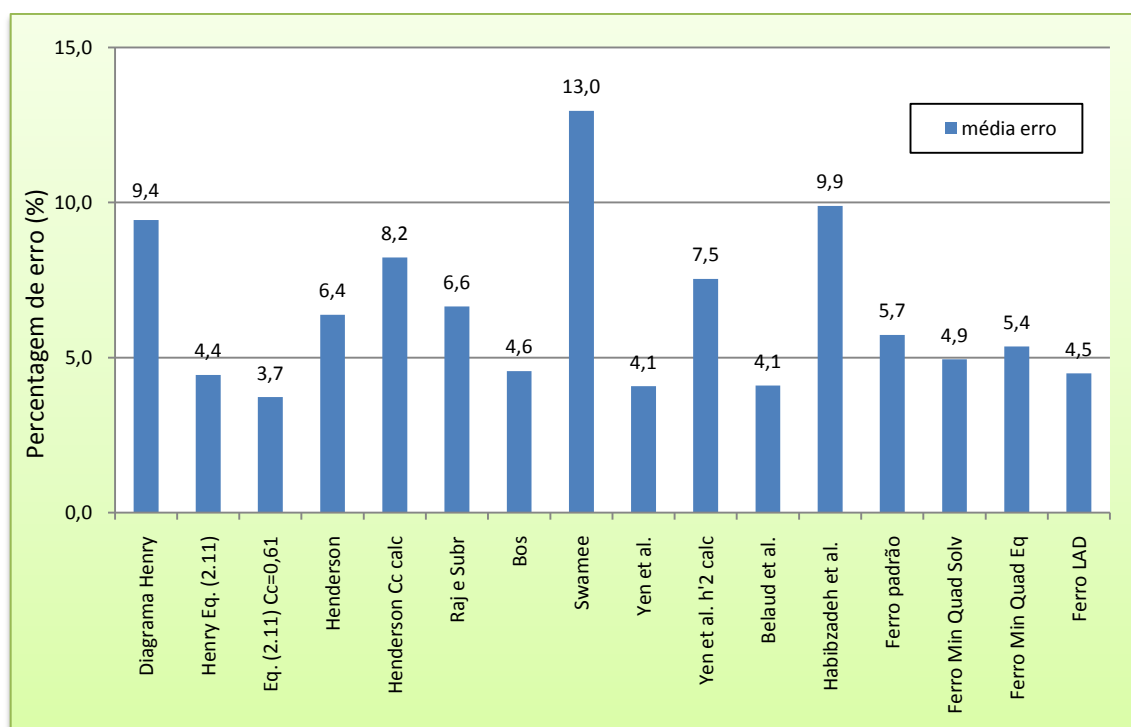


Figura 4.8 - Erro percentual absoluto médio por método de cálculo.

Pelo gráfico apresentado na Figura 4.8 pode concluir-se que, os métodos de cálculo considerados apresentaram na sua maioria erros percentuais absolutos médios próximos dos 5%, quando comparados com os resultados obtidos no canal experimental. A equação 2.11 de Henry (1950) com  $C_c = 0,61$ , foi a que gerou menores erros de cálculo. Esta equação obteve resultados precisos para todas as situações de escoamento consideradas, mostrando-se por isso uma boa opção de cálculo para vazão em comportas.

As equações de Bos (1989), Yen *et al.* (2001), Belaud *et al.* (2009) e de Ferro também demonstraram capacidade para o cálculo da vazão com precisão.

Os métodos estudados que apresentaram menor precisão de cálculo foram Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009), que originou erros percentuais absolutos médios acima dos 10% para as duas situações de ressalto, Habibzadeh *et al.* (2011) com erro percentual absoluto médio também elevado, o diagrama de Henry (1950), especialmente para ressalto submerso, e o método de Henderson (1966), quando é calculado o coeficiente de contração para cada ensaio.

### 4.3 Equações de fronteira

O caudal só pode ser determinado com rigor, conhecendo a situação em que o escoamento ocorre, e assim, aplicar o devido método de cálculo. No caso de uma comporta acionada automaticamente, tendo como apoio sensores que permitam fazer as leituras das alturas de água nos locais requeridos e já identificados, é através das equações de fronteira que é determinada a situação de ressalto. Estas equações representam um limite teórico entre o ressalto livre e o submerso, tendo como referência a altura de água a jusante do ressalto,  $h_3$ .

As equações de fronteira são resolvidas em ordem a  $h_3$  e é comparado este valor com o resultado de  $h_3$  medido no canal. Quando o valor de  $h_3$  medido no canal, é inferior ao valor calculado pela equação de fronteira, a equação considera que está a ocorrer ressalto livre. Se o valor medido for superior ao calculado pela equação de fronteira, esta considera que ocorre ressalto submerso.

Os valores de cálculo obtidos pelas várias equações de fronteira, apresentadas na revisão bibliográfica, são em seguida comparados com os resultados medidos em cada ensaio, para determinar qual equação consegue distinguir a situação de ressalto com maior rigor. As equações de fronteira são analisadas separadamente, por situação de ressalto. Na Figura 4.9 são comparados os valores calculados com os resultados medidos para ressalto livre e, na Figura 4.10, são comparados os valores calculados com os resultados medidos para ressalto submerso.

Os resultados foram organizados por ordem crescente de forma a facilitar a leitura.



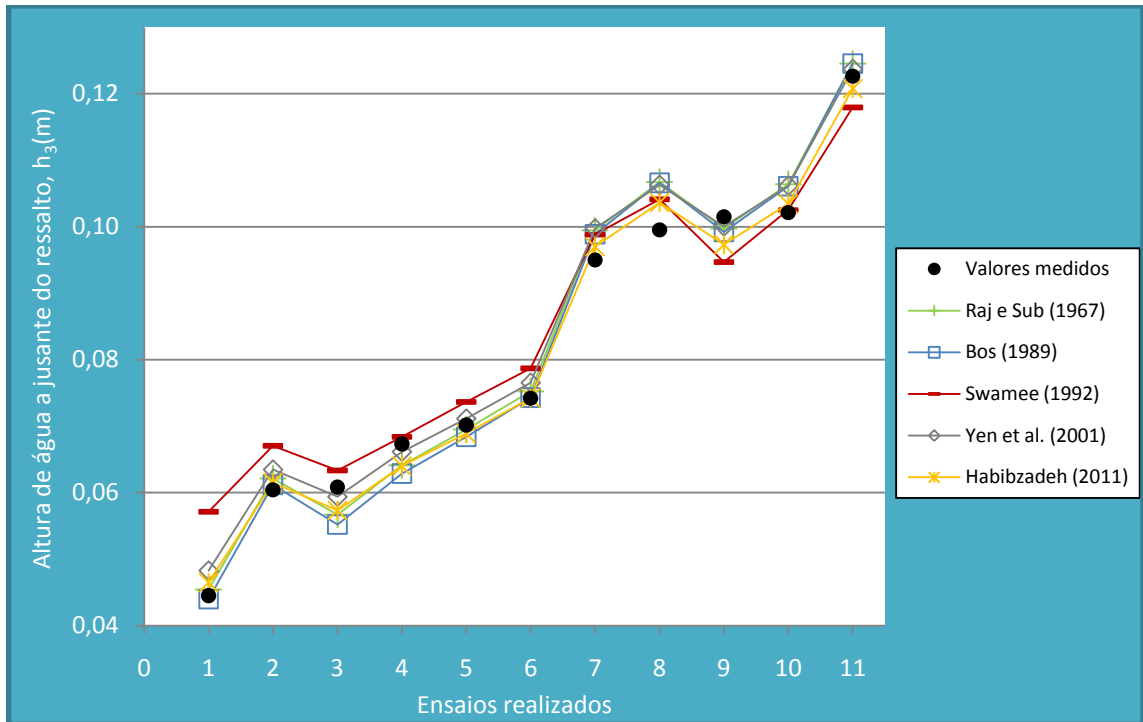


Figura 4.9 - Equações de fronteira para os ensaios com ressalto livre.

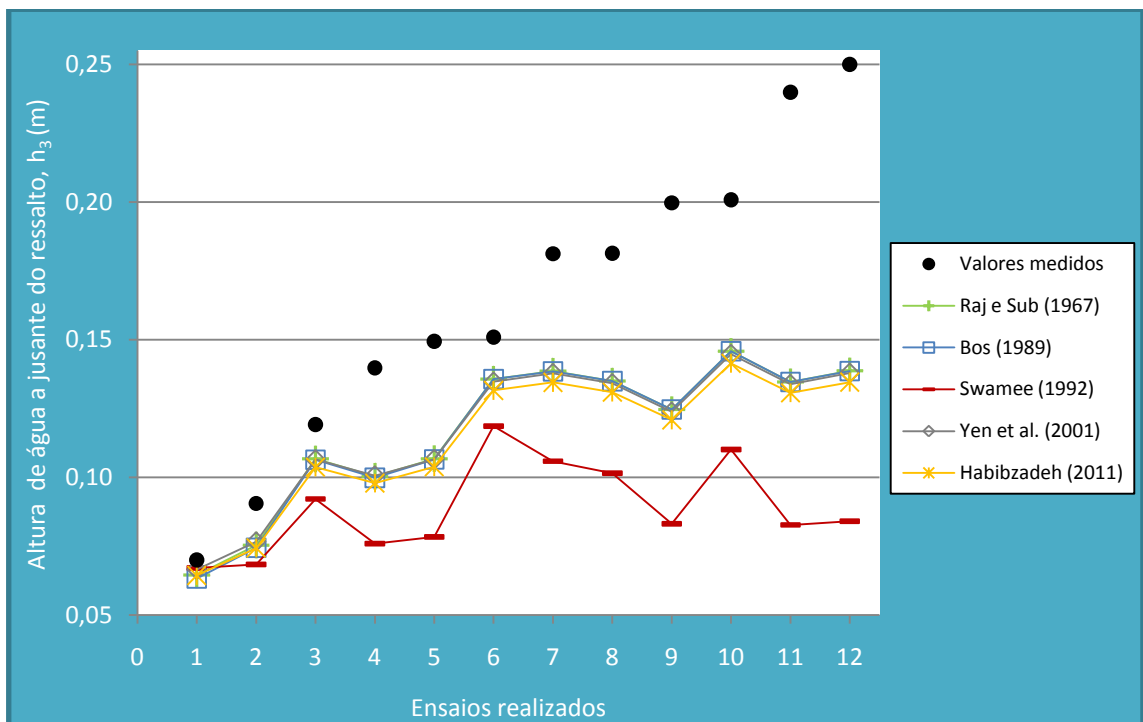


Figura 4.10 - Equações de fronteira para os ensaios com ressalto submerso.

Na Figura 4.9 colocaram-se todos os resultados de  $h_3$  medidos nos ensaios realizados com ressalto livre, comparados com os valores calculados pelas várias equações de fronteira. No caso

do ressalto livre, sabe-se que uma equação de fronteira admitiu corretamente a situação de ressalto, se os valores medidos foram inferiores aos calculados. Analisando a Figura 4.9 percebe-se que alguns dos valores de  $h_3$  medidos são superiores aos calculados pelas equações de fronteira, estando nessas situações as equações a admitir que o ressalto é submerso nesses ensaios, quando na verdade é livre.

O método que obteve mais precisão na determinação de ressalto livre foi o de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009), tendo gerado dois valores incorretos. Yen *et al.* (2001) obteve três valores incorretos, Rajaratnam e Subramanya (1967) *apud* Bijankhan e Kouchakzadeh (2011) gerou quatro incorreções, e as equações de Bos (1989) e de Habibzadeh *et al.* (2011) obtiveram cinco incorreções na determinação do ressalto livre.

Na determinação do escoamento com ressalto submerso, apresentado na Figura 4.10, todos os valores de  $h_3$  medidos foram superiores aos calculados pelas várias equações de fronteira, estando desta forma todos os cálculos corretos, admitindo que está a ocorrer ressalto submerso.

À exceção da equação de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009), as outras formulações são muito semelhantes em termos de construção e de resultados, especialmente notado na Figura 4.10 para ressalto submerso.

## 5 Conclusões

O estudo desenvolvido nesta dissertação para a determinação do caudal em comportas para várias situações de escoamento apresentou bons resultados, demonstrando que estão disponíveis várias equações capazes de realizar este cálculo com bastante precisão. Alguns métodos necessitam ainda ser melhorados para a situação de ressalto submerso.

Os resultados experimentais obtidos no canal laboratorial de hidráulica de Universidade de Évora, demonstram que existem soluções capazes de realizar o cálculo do caudal com erro percentual absoluto médio inferior a 5%, para os três grupos de equações estudadas.

De entre as equações baseadas no método da energia-quantidade de movimento, a equação proposta em Henry (1950) para determinar o coeficiente de vazão, associada depois à equação da energia para o cálculo do caudal, dá resultados muito precisos em todas as situações de escoamento, aumentado a sua precisão quando se opta pelo coeficiente de contração igual a 0,61. Apesar de muitos investigadores recentes apontarem o diagrama de Henry (1950) como uma referência de cálculo, esta equação não é referida, mas aqui conclui-se que é uma boa solução para determinar o caudal em comportas planas verticais. Ainda dentro do grupo de equações *E-M* destacam-se as apresentadas em Bos (1989) e em Yen *et al.* (2001).

No grupo de equações da *E-M* com introdução de um fator de correção, o método apresentado em Belaud *et al.* (2009) mostrou-se bastante preciso no cálculo da vazão. Apesar de se notar que o fator de correção unitário era o que gerava melhores resultados, o coeficiente de contração variável adaptou-se muito bem à equação destes investigadores.

O último grupo de equações estudadas, relativo ao método de Ferro, permitiu grande precisão para o cálculo de caudais nas situações de ressalto livre e submerso, à exceção da situação em que ocorre baixa submersão ou grande abertura de comporta. Esta situação requer mais investigação através da realização de novos ensaios neste tipo de submersão e no desenvolvimento de equações que assegurem o cálculo com precisão em todas as situações de escoamento.

De entre as equações de fronteira consideradas, a equação de Swamee (1992) *apud* Sepúlveda *et al.* (2009) representou com maior rigor o limite entre o ressalto livre e o submerso. No entanto, este tipo de equações necessita ser melhorado de forma a definir melhor o tipo de ressalto que está a ocorrer em determinada situação.

Para novos estudos relacionados com o tema desenvolvido nesta dissertação, será interessante alargar a investigação a canais protótipo, no sentido de testar as equações aqui

referidas em situações práticas. Neste tipo de canais, as condições de funcionamento têm algumas diferenças relativamente às laboratoriais. Desta forma, será talvez necessário adequar os métodos aqui testados para todas as situações de escoamento.

## Referências Bibliográficas

Ansar, M. (2001). "Discussion of 'Simultaneous flow over and under a gate' by V. Ferro." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(5), 325–326.

Belaud, G., Cassan, L., e Baume, J. (2009). "Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 135 (12), 1086-1091.

Bijankhan, M. e Kouchakzadeh, S. (2011). "Discussion of 'Benchmark of Discharge Calibration Methods for Submerged Sluice Gates' by Carlos Sepúlveda, Manuel Gómez, and José Rodellar". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 56-58.

Bijankhan, M., Ferro, V., Kouchakzadeh, S. (2012). "New Stage-Discharge Relationships for Free and Submerged Sluice Gates". *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 28, 50-56

Bos, M.G. (1989), *Discharge Measurement Structures*, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ ILRI, Publication No. 20, Wageningen, Netherlands.

Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulic*, McGraw-Hill Book Co., New York.

Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., e Replogle, J. A. (2003). "Calibration of submerged radial gates." *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 680–687.

Ferro, V. (2000). "Simultaneous flow over and under a gate." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(3), 190–193.

Ferro, V. (2001). "Closure to 'Simultaneous flow over and under a gate' by V. Ferro." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127(5), 326–328.

Habibzadeh, A., Vatankhah, A., e Rajaratnam, N. (2011). "Role of Energy Loss on Discharge Characteristics of Sluice Gates". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137(9), 1079–1084.

Henderson, F. M. (1966). "Open channel flow". The MacMillan Comp, New York.

Henriques, J. D, Palma, J. C, Ribeiro, A. S. (2007), Medição de caudal em Sistemas de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais Urbanas, Serie de Guias técnicos. Edição: Instituto Regulador de Águas e Resíduos; Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Henry, H. R. (1950). "Discussion of 'Diffusion of submerged jets,' by Albertson, M. L., Dai, Y. B. Jensen, R. A., e Rouse, H." Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 115, 687–694.

IPCC (2013). "Climate Change: The Physical Science Basis", Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Cambridge University Press, New York.

Lencastre, A. (1983), Hidráulica Geral, 2ª Edição Luso-Brasileira, Hidroprojecto, Lisboa.

Lin, C. H., Yen, J. F., e Tsai C. T. (2002). "Influence of Sluice Gate Contraction Coefficient on Distinguishing Condition". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 128(4), 249-252.

Manzanares, A. A. (1980), Hidráulica Geral, Vol. 2, AEIST, Lisboa.

Peterka, A.J. (1958). Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Col (8ª impressão 1984.)

PNUEA (2012). Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água: Implementação 2012-2020. Agência Portuguesa do Ambiente.

Quintela, A. C. (1981), Hidráulica, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa .

Rijo, M. (1993). "Estimativa de caudais num canal de rega através de uma soleira espessa modificada". Recursos Hídricos, 14(1): 21-28.

Rijo, M. (2010), Canais de Adução - Projecto, Operação, Controlo e Modernização, Edições Sílabo, Lisboa.

Sepúlveda, C. (2008), "Instrumentation, model identification and control of an experimental irrigation canal." Ph.D. thesis, Technical Univ. of Catalonia, Barcelona, Spain.

Sepúlveda, C., Gómez, M. e Rodellar, J. (2009). "Benchmark of Discharge Calibration Methods for Submerged Sluice Gates " . Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 135 (5), 676-682.

UN (2006). United Nations 2<sup>nd</sup> World Water Development Report: Water, a shared responsibility. UNESCO, New York.

USBR (2001), Water Measurement Manual - A Water Resources Technical Publication, U. S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation, Government Printing Office, Washington, DC.

World Water Assessment Programme, (2009). The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris: UNESCO, and London: Earthscan.

Yen, J. F., Lin, C. H., e Tsai, C. T. (2001). "Hydraulic Characteristics and Discharge Control of Sluice Gates". Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 24, No. 3, 301-310.