



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Influência da Contração Lateral em Diferentes Saídas de Caixas de Visita

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Autor

Joana Teresa Ribeiro Pião

Orientadores

Maria Rita Lacerda Morgado Fernandes de Carvalho

Mesquita David

Jorge Eduardo Teixeira Leandro

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Janeiro, 2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, exemplos de perseverança, sinto-me grata pela presença, incentivo, apoio e por todo o investimento académico que tiveram comigo. O amor incondicional que nos une tornou a realização deste trabalho mais forte.

À minha irmã pelas palavras sábias, pelo carinho, cumplicidade e pela atenção que sempre teve comigo. Um muito obrigado pelo seu apoio constante e por tudo o que fomos construindo juntas.

Aos meus avós pela compreensão nos momentos em que a dedicação aos estudos foi exclusiva, pelo carinho e pelas palavras de esperança e preocupação.

Ao Pedro pelo carinho, dedicação, paciência, companheirismo e amizade, o que permitiu que eu seguisse sempre mais além.

Aos meus colegas da faculdade, não só pelo facto de termos convivido durante todos estes anos, mas principalmente por terem cruzado o meu caminho. Agradeço a verdadeira amizade que construímos.

A todos os meus amigos e familiares que me acompanharam durante a minha caminhada. A todos esses que fizeram parte do meu crescimento enquanto pessoa e àqueles que mesmo distantes torceram por mim, um muito obrigado.

Aos meus Orientadores Rita Carvalho e Jorge Leandro que dedicaram seu tempo e sua sabedoria na construção deste trabalho. A transmissão de conhecimentos foi notável. Um muito obrigado.

Ao Martin e Pedro por todo o apoio que me deram na parte experimental do meu trabalho, um muito obrigado.

Ao Sr. Joaquim por todo o apoio, conhecimento prático, disponibilidade e execução de todas as melhorias necessária sem as quais o trabalho não era o mesmo.

RESUMO

A colocação de caixas de visita com queda em sistemas de drenagem urbanos pode ser usada para reduzir as velocidades excessivas do escoamento, uma vez que as altas velocidades nos coletores são responsáveis por danos estruturais e desgaste. Há certos parâmetros como a geometria da caixa de visita, as características do escoamento a montante e a jusante e as possíveis transições entre a caixa de visita e os coletores, que controlam o fluxo no interior da caixa de visita.

Este trabalho tem como objetivos determinar o coeficiente de vazão e a dissipação de energia numa caixa de visita quadrada com três diferentes configurações de saída: secção igual a toda a largura do coletor; secção quadrada de largura inferior ao coletor, com contração lateral e secção circular de dimensão inferior ao coletor. O estudo é realizado para diferentes caudais e diferentes aberturas de comporta para cada uma das três configurações. A caixa de visita tem 0.5m x 0.5m de secção transversal e 1.0m de altura e. É alimentada por um reservatório a montante. Encontra-se instalada a montante de um canal de secção retangular aberto com 0.5m de largura, com 1% de inclinação.

Um sensor acústico com efeito doppler (ADV) foi utilizado para medir velocidades em diversos pontos no canal a jusante da caixa de visita, a fim de obter os parâmetros de turbulência do escoamento e verificar as condições de escoamento.

PALAVRAS-CHAVE: caixa de visita; coeficiente de vazão; dissipação de energia; aberturas da comporta; parâmetros de turbulência; ADV; contração lateral

ABSTRACT

The placement of manholes with decrease in urban drainage systems can be used to reduce excessive speeds of the flow, since the velocities in the collectors are responsible for structural damage and abrasion. There are certain parameters such as the geometry of the manhole, the flow characteristics upstream and downstream and the possible transitions between the manhole and the collectors, which control the flow within the manhole.

This study aims to determine the flow coefficient and the energy dissipation in a squared manhole with three different output settings: section equal to the entire width of the collector; square section width below the collector, with lateral contraction and circular section smaller than the collector. The study is performed for different flow rates and different apertures of the gate for each of the three configurations. The manhole has 0.5mx 0.5m cross-section and 1.0m high and is powered by a reservoir upstream. It is installed upstream of an opened channel with rectangular section with 0.5m wide, with 1% slope.

An acoustic sensor with Doppler effect (ADV) was used to measure speed without various points on the channel downstream of the manhole in order to obtain the parameters of turbulence of the flow and to verify flow conditions.

KEYWORDS: drop manhole; discharge coefficient; energy dissipation; gate openings; turbulence parameters; ADV; lateral contraction

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	x
ACRÓNIMOS	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento Geral	1
1.2. Objectivos	2
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	3
2.1. Perspetiva Histórica	3
2.2. Escoamento através de Orifícios.....	5
2.3. Escoamentos sobre descarregadores	11
2.4. Estudos feitos sobre Caixas de Visita	13
2.5. ADV – Acoustic Doppler Velocimetry	16
3. METODOLOGIA.....	19
3.1. Descrição Geral da Instalação.....	19
3.2. Metodologia Experimental	21
3.3. Metodologia de Cálculo.....	23
3.3.1. Definição das alturas h_0	23
3.3.2. Cálculo de Coeficientes de Vazão	23
3.3.3. Cálculo da energia de dissipação.....	24
3.3.4. Intensidade da turbulência a jusante da comporta	26
4. RESULTADOS	30
4.1. Análise do Coeficiente de Vazão	30
4.1.1. Configuração nº 1 – Seção igual a toda a largura do coletor.....	30
4.1.2. Configuração nº 2 – Seção quadrada com contração lateral.....	34
4.1.3. Configuração nº 3 – Seção de saída de geometria circular.....	38
4.1.4. Comparação da altura de abertura da comporta comum a todas as configurações ($h_0=10\text{cm}$):.....	41
4.1.5. Cruzamento de dados.....	44

4.2.	Análise da Dissipação de Energia.....	48
4.3.	Análise dos resultados obtidos pelo ADV – Intensidade da Turbulência.....	54
4.3.1.	Configuração n° 1 – seção igual a toda a largura do coletor – Figura 4.23	55
4.3.2.	Configuração n° 2 – seção quadrada com contração lateral – Figura 4.24.....	56
4.3.3.	Configuração n° 3 – seção de saída de geometria circular – Figura 4.25.....	57
5.	CONCLUSÃO.....	59
5.1.	Conclusões	59
5.2.	Sugestões para o prosseguimento do estudo.....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	ANEXO A	A-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Cloaca Máxima (Fonte: http://www.bsr.ac.uk)	3
Figura 2.2 - Ilustração de um orifício (Fonte: Azevedo Netto e Alvarez, 1982).....	5
Figura 2.3 - Tipos de orifício: a) Totalmente Submerso; b) Parcialmente Submerso (Fonte: Lencastre, 1972).....	6
Figura 2.4 - Orifício de pequenas dimensões (Fonte: Querido, 2011)	6
Figura 2.5 - Orifício retangular de grande altura (Fonte: Querido, 2011).....	9
Figura 2.6 - Orifício rectangular (Fonte: http://www.em.ufop.br)	10
Figura 2.7 - Representação de um descarregador (Fonte: Azevedo Netto e Alvarez,1982)	11
Figura 2.8 - Esquema de um Descarregador (Fonte: Azevedo Netto e Alvarez,1982)	12
Figura 2.9 - Regimes definidos pela zona de impacto do jacto e pelos seus limites relativamente às diferentes alturas do colchão de água: a) altura do colchão de água inferior à abertura da comporta; b) altura do colchão de água superior à abertura da comporta. (Fonte: Carvalho e Leandro, 2010).....	14
Figura 2.10 - Representação das quatro configurações : a) Configuração 1; b) Configuração 2; c) Configuração 3; d) Configuração 4. (Fonte: Querido, 2010)	16
Figura 2.11 - ADV: esquematização do seu funcionamento (Fonte: http://www.sontek.com)	17
Figura 2.12 - Recolha de dados do ADV.....	18
Figura 2.13 - Instalação do ADV	18
Figura 3.1 - Canal multiusos do LHRHA.....	19
Figura 3.2 - Interface gráfico do sistema SCADA do LHRHA (Fonte: Querido, 2010).....	20
Figura 3.3 - Solução para a bidimensionalidade do fluxo	21
Figura 3.4 - Representação esquemática da caixa de visita (vista lateral) com ADV.....	21
Figura 3.5 - Situação de descarregador para $h < h_0$ (Fonte: Querido, 2011)	24
Figura 3.6 – Interface do WinADV (Fonte: http://www.usbr.gov)	28
Figura 3.7 – Posições do ADV no canal.....	28
Figura 4.1 - Configuração nº1	30
Figura 4.2 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q).....	31
Figura 4.3 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h_0).....	32
Figura 4.4 - Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h_0) e o caudal (Q).....	33
Figura 4.5 - Configuração nº 2	34

Figura 4.6 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q).....	35
Figura 4.7 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0).....	36
Figura 4.8 - Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0) e o caudal (Q).....	37
Figura 4.9 - Configuração nº3	38
Figura 4.10 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q).....	39
Figura 4.11 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0)	40
Figura 4.12 - Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0) e o caudal (Q).....	41
Figura 4.13 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q).....	42
Figura 4.14 - Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0)	43
Figura 4.15 - Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0) e o caudal (Q).....	44
Figura 4.16 - Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0) e o caudal (Q) para as aberturas “h0” comuns.....	45
Figura 4.17 - Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0) e o caudal (Q) para aberturas h0 relativas às mesmas áreas de saída entre a configuração nº1 e a configuração nº2	46
Figura 4.18 -Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (hm/h0) e o caudal (Q) para as aberturas das configurações nº 1 e nº2 relativas à seção total, a ½ seção e a ¾ da seção da 3ª configuração.....	47
Figura 4.19 - Dissipação de energia devido à queda na caixa de visita (η_q) para as três configurações: a) seção igual a toda a largura do coletor; b) seção quadrada com contração lateral; c) seção de saída de geometria circular.....	49
Figura 4.20 - Dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico (η_{rh}) para as três configurações: a) seção igual a toda a largura do coletor; b) seção quadrada com contração lateral; c) seção de saída de geometria circular.....	51
Figura 4.21 - Dissipação de energia total (η_T) para as três configurações: a) a) seção igual a toda a largura do coletor; b) seção quadrada com contração lateral; c) seção de saída de geometria circular	52
Figura 4.22 - Dissipação de energia (para os “h0=10cm” comum a todas as configurações), devido: a) à queda na caixa de visita (η_q) ; b) ao ressalto hidráulico a jusante da caixa de visita (η_{rh}); c) total (η_T).....	54

Figura 4.23 - Dissipação de energia (para os “ $h_0=10\text{cm}$ ” comum a todas as configurações), devido: a) à queda na caixa de visita (η_q) ; b) ao ressalto hidráulico a jusante da caixa de visita (η_{rh}); c) total (η_T).....	55
Figura 4.24 - relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência ($\text{RMS}[V']$) relativa a configuração nº 2 para: a) $Q=8.93\text{ l/s}$; b) $Q=12.69\text{ l/s}$	56
Figura 4.25 - relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência ($\text{RMS}[V']$) relativa a configuração nº 3 para: a) $Q=8.93\text{ l/s}$; b) $Q=12.69\text{ l/s}$	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1- Representação das comportas para cada configuração e respectivas aberturas h_0	20
Quadro 3.2 - Comportamento dos diferentes escoamentos livres de David Apsley(2013).....	27
Quadro 3.3 - Indicação das posições do ADV no canal	29
Quadro 3.4 - Aberturas de canal estudadas	45

ACRÓNIMOS

ADV – Velocímetro Acústico Doppler

LHRA – Laboratório de Recursos Hídricos e Ambiente

RMS – Root Mean Square

DEC – Departamento de Engenharia Civil

FCTUC – Faculdade de ciência e Tecnologias de Coimbra

SCADA - Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Geral

As câmaras ou caixas de visita são dos órgãos mais numerosos e mais vulgares, em sistemas de drenagem de águas residuais comunitárias e de águas pluviais e, ainda, nos sistemas unitários. Estas têm como objetivo permitir a inspeção e limpeza de coletores, a remoção de obstruções e a verificação das características de escoamento e da qualidade das águas residuais.

As caixas de visita devem ser construídas com materiais que garantam a respetiva durabilidade e apresentar uma resistência mecânica suficiente às cargas que lhe são aplicadas e podem apresentar corpo circular ou corpo retangular. Geralmente aplicam-se, de preferência as caixas de visita de corpo circulares. As de corpo retangular ou quadrado são utilizadas quando é necessário recorrer a tijolo, blocos de cimento ou pedra geralmente nos casos em que falta material pré-fabricado para a sua construção.

As caixas de visita com queda são implementadas em sistemas de drenagem urbanos íngremes para reduzir as velocidades do fluxo (Granata, Gargano, Hager, et al., 2007), pois velocidades elevadas podem danificar os coletores e levar a maus desempenhos hidráulicos nas suas junções, sendo assim, frequentemente utilizados como dissipadores de energia em sistemas de drenagem. De acordo com (Granata e Gargano, 2009) a dissipação de energia de uma caixa de visita é principalmente afetada pelas condições de operação, isto é, o regime de escoamento, dependendo da geometria desta. Estas devem funcionar de tal modo que a energia a montante e a jusante deve ser a mesma. Porém tal não acontece dada a ampla gama de descargas verificadas em sistemas de drenagem em casos de inundação. Uma insuficiente dissipação de energia poderá levar a que, a energia cinética na saída da caixa seja superior à energia na entrada e à ocorrência de más condições hidráulicas (Rajaratnam et al. 1997), tais como velocidades excessivas a jusante associadas a fenómenos de turbulência que poderão trazer graves problemas aos coletores.

As caixas de visita em sistemas de drenagem são normalmente limitadas em altura como orientação preventiva por forma a restringir condições locais adversas dentro das estruturas (Camino, 2009).

O tipo de escoamento depende da geometria da caixa de visita, da capacidade de vazão a jusante, das características de escoamento a montante e das transições entre a caixa e os coletores. Por forma a controlar o escoamento faz-se o uso de comportas verticais (Bagheri et al., 2010; Swamee, 1992).

Segundo (Lencastre, 1972) o escoamento através de comportas assemelha-se ao escoamento através de orifício, havendo situações, quando o bordo superior não interfere na descarga, em que funciona como descarregador. Estas duas terminologias são importantes por forma a fazer uma avaliação mais detalhada no que toca ao parâmetro coeficiente de vazão.

De acordo com (Granata et al. 2009), a dissipação total de energia devida à queda na caixa de visita é maior para diâmetros da caixa menores e é menor para menores alturas de queda da água na caixa. A perda de carga também é condicionada pelas condições e direção do escoamento a jusante, assim como a dissipação de energia depende do ressalto hidráulico (Chanson, 2004). Desta forma, torna-se crucial avaliar a dissipação de energia.

1.2. Objectivos

O presente trabalho propõe a execução de experiências de laboratório, em modelos de larga escala, de um sistema caixa de visita com queda e diferentes geometrias de saída. A sua finalidade é a de determinar o coeficiente de vazão e a dissipação de energia em caixas de visita com três diferentes configurações de saída: seção igual a toda a largura do coletor, seção quadrada com contração lateral e seção de saída de geometria circular. O estudo é realizado para diferentes caudais e diferentes aberturas de comporta, para cada uma das três configurações repetir

Para cada geometria e respetiva contração lateral, determinaram-se:

- as alturas de escoamento a montante e a jusante da comporta para a gama de caudais em estudo;
- os coeficientes de vazão e fazer a sua análise tendo em conta a gama de caudais;
- a dissipação de energia relativa a cada configuração;

Analizou-se ainda a ocorrência de turbulência a jusante da comporta através do uso do ADV.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1. Perspetiva Histórica

Neste capítulo mostra-se o enquadramento histórico sobre a evolução da drenagem de águas residuais em meio urbano em Portugal e no Mundo.

A drenagem urbana tem sido praticada há mais de cinco mil anos, mas o reconhecimento e compreensão dos impactos desta para o ambiente e a necessidade de atenuação de tais impactos surgiu nos últimos 40-50 anos.

Através de registos históricos constatou-se que foi na Mesopotâmia nos anos 2500 A.C. que se verificou o início das estruturas de drenagem e saneamento, incluindo uma espécie de sarjetas e sumidouros para a recolha de águas de superfície e encaminhamento para os coletores (Maner, 1971). Os materiais utilizados foram o tijolo e o asfalto. As habilidades de construção de drenagem cresceram mais tarde na antiga Roma e Pompeia. Ao que parece, o melhor exemplo dos antigos sistemas de drenagem é a Cloaca Máxima, que foi construída em Roma por volta de 510 A.C por forma a melhorar a qualidade de vida urbana tendo a sua duração até ao século XIX (Marsalek, 2004). Cloaca é um termo latino que significa “condutor de drenagem urbana” enquanto o termo coletor provém do latim *co-lego* que significa juntar, reunir e traduz o conceito da formação de rede de drenagem, constituída por troços interligados, os coletores, onde se reúnem e de onde depois transportam as águas afluentes (Matos, 2003). A figura 2.1 ilustra a Cloaca Máxima de Roma.



Figura 2.1 - Cloaca Máxima (Fonte: <http://www.bsr.ac.uk>)

Desde os tempos do Império Romano até ao século XVII, não se verificou na Europa uma evolução dos sistemas de saneamento e de drenagem em meio urbano. Durante parte da Idade Média as questões relacionadas com a higiene e limpeza não eram tidas em conta por parte

dos cidadãos. Mais tarde, entre os séculos XIV e XVIII, nas grandes cidades europeias é que se observou uma evolução nos trabalhos de drenagem e de evacuação das águas residuais. Em Paris, em 1370, surgiu a primeira vala coberta (coletor enterrado), a fossa de St. Opportune, mais conhecida como coletor de cintura o que descarregava para o rio Sena. Por outro lado, a drenagem de extensas áreas da cidade de Paris foi feita através de “*valas abertas de esgoto*” (Matos, 2003) até ao século XVIII. O conceito de “*coletor enterrado*” só foi conhecido séculos mais tarde como foi o caso de Londres em que o primeiro coletor deste tipo só foi planeado no início do século XVII.

No início do século XIX começaram-se a introduzir sistemas de abastecimento e de distribuição de água domiciliária construídos com tubagens de ferro fundido funcionando sob pressão, o que se traduziu numa revolução tecnológica. Já no final do século XIX o uso de betão em coletores de seção circular com auto-limpeza e sem juntas transversais constitui um marco relevante.

No que toca à evolução em Portugal, os primeiros elementos históricos remontam ao século XV. De acordo com os casos de peste verificados na altura, o rei D. João II mandou proceder a operações de limpeza nos “canos” destinados inicialmente à drenagem de águas da chuva onde se juntavam as águas provenientes dos dejetos da população da cidade de Lisboa, o que a tornava “menos elegante e mais insalubre” (Matos, 2003).

A partir do terramoto de 1755 verificou-se um desenvolvimento em Lisboa devido à reedificação da cidade e implementação do sistema de “canalização metódica”, cujos coletores unitários dispostos em malha com ligação ao estuário do Tejo ainda se fazem perdurar até aos dias de hoje.

Devido aos sinais da epidemia da Cólera sentidos em Lisboa no ano de 1856 e alastrada numa fase posterior, Bernardino Gomes, por ordem da Academia Real das Ciências ordenou a instalação de sistemas de drenagem como já acontecia em outras cidades europeias tais como Paris, Londres e Bruxelas.

Quando se iniciou o sistema de abastecimento de águas domiciliário, já havia estruturas para a drenagem das águas pluviais urbanas sob os arruamentos da cidade de Lisboa. A partir dos finais do século XIX foi construída a maior parte da rede de drenagem de Lisboa, nas chamadas “Avenidas Novas” e em alguns bairros como o de Campo de Ourique cujos coletores de alvenaria eram assentes em vala.

Em meados do século XX o sistema separativo que já antes existia no Reino Unido, passou a ser universal no que toca ao estabelecimento da drenagem de novas urbanizações e núcleos urbanos. O primeiro sistema separativo a ser construído em Portugal foi na cidade do Porto, em que o projeto foi feito pelos ingleses. Entre os anos quarenta e cinquenta, a maioria dos grandes aglomerados populacionais do país já eram providos de coletores pluviais e unitários muitos deles fomentados por Fontes Pereira de Melo, o que caracterizou uma época de grande explosão construtiva. Mais tarde, nas décadas de cinquenta a setenta grande parte dos sistemas de drenagem unitários existentes foram remodelados e complementados tendo por base os

planos gerais de saneamento. Foram igualmente instaladas novas redes de drenagem separativas em algumas cidades tais como Barreiro, Beja, Viseu, Tomar, Lisboa e Elvas em que se fez manter nos núcleos urbanos mais antigos e mais densamente povoados os antigos coletores unitários complementando-os com descarregadores de tempestade e obras de desvio. Tal efeito facilitou a ligação às condutas e emissários dos sistemas separativos adjacentes, construídos em áreas recentemente edificadas. Na década de oitenta e noventa houve um crescimento no investimento em saneamento nos grandes núcleos urbanos. Nas últimas décadas tem-se conferido um aumento dos aglomerados e uma “pressão ambiental” nos meios recetores. Este aumento tem dificultado a gestão global do saneamento pois não é compatível com antigos modelos de crescimento e de resposta no que toca à prestação de serviços de saneamento. Deste modo tornou-se importante investir em novos sistemas e promover a reabilitação de sistemas de saneamento já existentes através de tecnologias e soluções apropriadas. Mas acima de tudo tornou-se necessário investir na gestão integrada e nos conhecimentos de forma sustentada.

2.2. Escoamento através de Orifícios

De acordo com (Azevedo Netto e Alvarez, 1982), os orifícios são perfurações geralmente de forma geométrica, feitas abaixo da superfície livre do líquido, em paredes de reservatórios, tanques, canais ou canalizações. A Figura 2.2 ilustra o caso de um orifício.

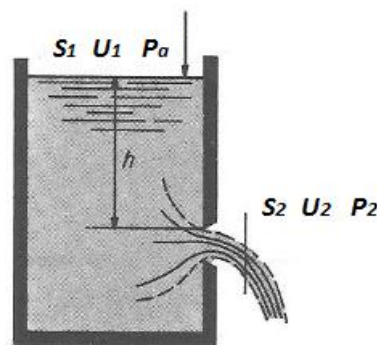


Figura 2.2 - Ilustração de um orifício (Fonte: Azevedo Netto e Alvarez, 1982)

Um orifício é considerado “totalmente submerso” (Figura 2.3 a)) quando a água a jusante está a um nível acima do bordo superior do orifício. Por outro lado, é considerado “parcialmente submerso” (Figura 2.3 b)) quando a água a jusante está a um nível compreendido entre o bordo superior e o bordo inferior do orifício.

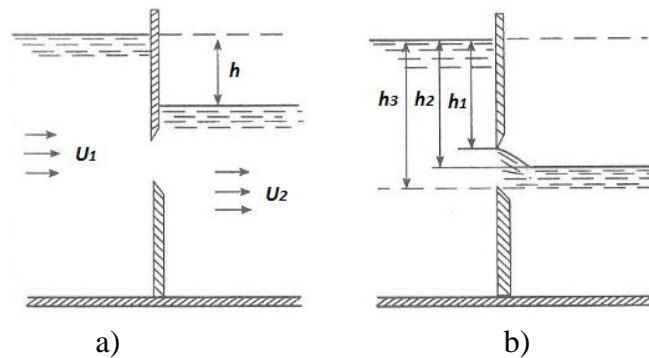


Figura 2.3 - Tipos de orifício: a) Totalmente Submerso; b) Parcialmente Submerso
(Fonte: Lencastre, 1972).

Estes podem ser classificados quanto à forma: circulares, rectangulares, etc; quanto às suas dimensões relativas: em pequenos e grandes. Os orifícios são considerados pequenos quando as suas dimensões são muito menores relativamente à profundidade em que se encontram, isto é, dimensão vertical igual ou inferior a um terço da profundidade. Também podem ser classificados, em parede delgada e de parede espessa, conforme o jacto líquido apenas toca a perfuração numa linha que constitui o perímetro do orifício ou se verifica a aderência ao jacto (Azevedo Netto e Alvarez,1982).

No caso de orifícios pequenos de parede delgada, verifica-se uma contração da veia líquida no jacto de saída de modo que se estabelece uma seção contraída com área inferior à do orifício. O coeficiente de contração C_C representa a relação entre a área da seção contraída S_2 e a área do orifício S (Figura 2.4)

$$C_C = \frac{S_2}{S} \quad (1)$$

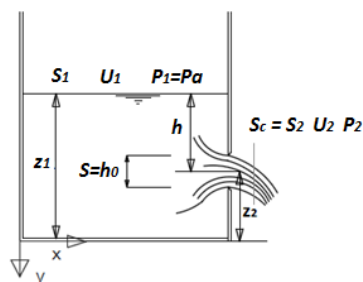


Figura 2.4 – Orifício de pequenas dimensões (Fonte: Querido, 2011)

No caso de orifícios pequenos, pode-se admitir, sem erro apreciável, que todas as partículas atravessam o orifício animadas da mesma velocidade, sob a mesma carga h .

Através do uso do teorema de Bernoulli, entre as secções 1 e 2 (Figura 2.4), é possível determinar a velocidade de saída U_2 .

$$\frac{U_1^2}{2g} + \frac{p_a}{\gamma} + z_1 = \frac{U_2^2}{2g} + \frac{p_a}{\gamma} + z_2 \quad (2)$$

Em que:

$\frac{U_1^2}{2g}$: altura cinética no reservatório;

$\frac{U_2^2}{2g}$: altura cinética na secção contraída;

$\frac{p_1}{\gamma}$: altura piezométrica no reservatório;

$\frac{p_2}{\gamma}$: altura piezométrica na secção contraída;

z_1 : cota geométrica em relação ao plano horizontal de referência no reservatório;

z_2 : cota geométrica em relação ao plano horizontal de referência na secção contraída.

Nesta situação, como a secção S_2 do orifício é muito pequena em relação a S_1 , a velocidade V_1 é desprezável relativamente a V_2 .

$$U_2^2 = 2g \left(z_1 + \frac{p_a - p_2}{\gamma} \right) \leftrightarrow U_1^2 = \sqrt{2g \left(z_1 + \frac{p_a - p_2}{\gamma} \right)} \quad (3)$$

Como a veia líquida se escoar na atmosfera, $p_2 = p_a$ e como $h = z_1 - z_2$ (carga sobre o centro do orifício), é possível obter-se a expressão do teorema de Torricelli.

$$U_2 = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

No caso dos fluidos reais, a velocidade U_2 é ligeiramente inferior, uma vez que o fluxo é influenciado pelo atrito e pela viscosidade. Deste modo, introduz-se um coeficiente de correção, ou seja, o coeficiente de redução de velocidade, C_v :

$$U_2 = C_v U_2 = C_v \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Como o caudal é dado por:

$$Q = SU = S_2U_2 \quad (6)$$

Então:

$$Q = SC_cC_v\sqrt{2gh} \quad (7)$$

sendo que o produto C_cC_v representa o coeficiente de descarga C_d .

Deste modo é possível obter-se a fórmula geral para pequenos orifícios:

$$Q = CS\sqrt{2gh} \quad (8)$$

Em que:

h = carga sobre o centro do orifício (m)

S = área do orifício (m^2)

C = coeficiente de vazão

No caso de orifícios circulares em paredes delgadas, é possível obter, através da análise teórica o valor do coeficiente de contração, cuja a sua determinação e a do coeficiente de vazão é possível através de meios experimentais (Quintela,1981):.

Caso se tenha um orifício de grandes dimensões estar colocado no fundo de um reservatório, as fórmulas anteriores mantêm a sua validade (Lencastre, 1972). Contudo, quando se pretende calcular o caudal escoado por um orifício de grandes dimensões numa parede vertical, decompõe-se o orifício em faixas retangulares horizontais, de altura elementar dh e determina-se o caudal elementar por (Quintela,1981):

$$dQ = Cb\sqrt{2gh} dh \quad (9)$$

Desta forma, o caudal obtém-se procedendo à sua integração:

$$Q = C \int_1^{h_2} b\sqrt{2gh} dh \quad (10)$$

C representa o coeficiente de vazão para a totalidade do orifício a ser determinado pela via experimental.

Quando se tem um orifício retangular com dois bordos horizontais de largura b (Figura 2.5), o caudal pode ser determinado mediante a seguinte fórmula:

$$Q = \frac{2}{3} Cb\sqrt{2g} (h_2^{\frac{3}{2}} - h_1^{\frac{3}{2}}) \quad (11)$$

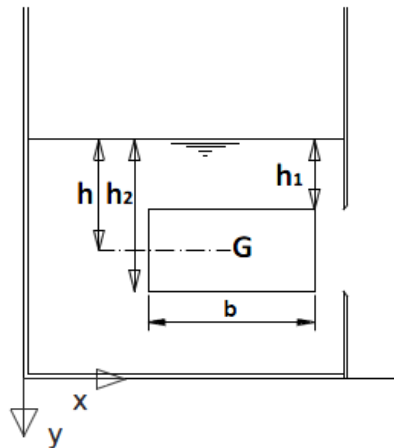


Figura 2.5 – Orifício retangular de grande altura (Fonte: Querido, 2011)

Quando se está perante um caso de *orifícios totalmente submersos*, o caudal pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$Q = CS[U_2 + \sqrt{2gh + U_1^2 - U_2^2}] \quad (12)$$

Em que:

C : coeficiente da vazão

h : diferença de nível entre montante e jusante

U_1 : velocidade média a montante;

U_2 : velocidade média a jusante.

Caso as velocidades U_1 e U_2 sejam desprezáveis a equação para o cálculo do caudal será:

$$Q = CS\sqrt{2gh} \quad (13)$$

Para *orifícios parcialmente submersos* considera-se a decomposição em duas partes, em que uma é livre e outra é submersa:

$$Q = C_1b(h_3 - h_2)\sqrt{2gh_2} + \frac{2}{3}Cb\sqrt{2g}\left(h_2^{\frac{3}{2}} - h_1^{\frac{3}{2}}\right) \quad (14)$$

Onde C_1 e C_2 correspondem aos coeficientes de vazão da parte livre e da parte submersa respetivamente.

Quando se tratam de orifício circulares, a seção contraída encontra-se a uma distância da face interna do orifício que corresponde aproximadamente à metade do diâmetro do orifício. (Azevedo Netto e Alvarez,1982).

Dependendo da posição do orifício, quando existe superfícies próximas, a contração da veia pode ser afetada, alterando-se a vazão. A contração é considerada completa quando o orifício fica distante do fundo ou das paredes laterais do reservatório (Quintela, 1981). Deste modo é preciso que o orifício esteja localizado a uma distância do fundo ou das paredes laterais (Figura 2.6) pelo menos igual a duas vezes a sua menor dimensão para que a contração seja completa, produzindo-se em todo o contorno da veia.

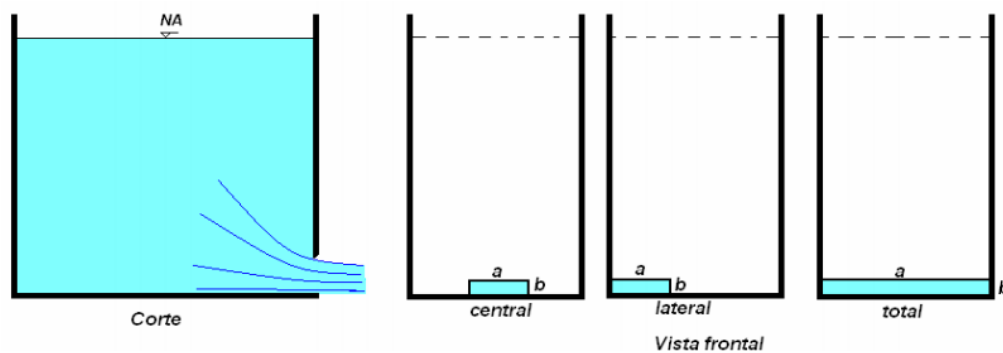


Figura 2.6 – Orifício retangular (Fonte: <http://www.em.ufop.br>)

Para orifícios abertos junto ao fundo ou às paredes laterais é necessário efetuar-se uma correção. Neste caso aplica-se um coeficiente de descarga $C'd$ () (Azevedo Netto e Alvarez,1982).

No caso d se ter:

→orifícios retangulares:

$$C'd = Cd(1 + 0.15k) \quad (15)$$

com $k = \frac{\text{perímetro da parte em que há supressão}}{\text{perímetro total do orifício}}$

De acordo com a Figura 2.6, tem-se os diferentes valores de k:

$$k = \frac{b}{2(a + b)} \quad (16)$$

$$k = \frac{a + b}{2(a + b)} \quad (17)$$

$$k = \frac{2a + b}{2(a + b)} \quad (18)$$

→ orifícios circulares:

$$C'_d = C_d(1 + 0.13k) \quad (19)$$

Em que:

- $k = 0.25$ para orifício junto a uma parede lateral e para junto ao fundo;
- $k = 0.5$, para orifício junto ao fundo e a uma mesma parede lateral;
- $k = 0.75$, para orifício juntos ao fundo e a duas paredes laterais.

2.3. Escoamentos sobre descarregadores

Um descarregador é considerado um orifício sem bordo superior (Azevedo Netto e Alvarez,1982). Tal acontece quando se suprime a parte superior de um orifício que esteja localizado na parede vertical ou inclinada de um reservatório. Deste modo, a parte superior veia líquida fica em contacto com a atmosfera na passagem pelo descarregador (Quintela, 2007).

De acordo com a Figura 2.7, a borda horizontal é definida como crista ou soleira. As faces do descarregador são constituídas pelas bordas verticais e a carga do descarregador H , corresponde à altura atingida pela água, a contar da cota de soleira do descarregador. A carga H deve ser medida a montante, a uma distância aproximadamente igual ou superior a $5H$ devido à depressão da lâmina vertente, junto ao descarregador. (Azevedo Netto e Alvarez,1982).

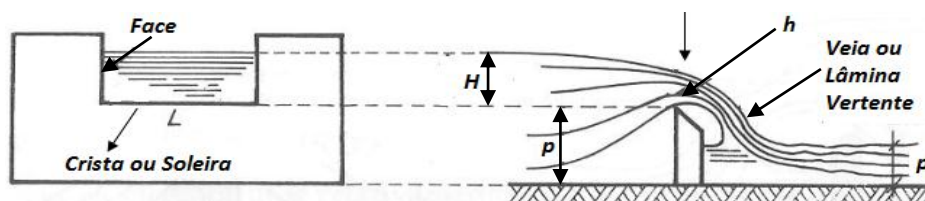


Figura 2.7 – Representação de um descarregador (Fonte: Azevedo Netto e Alvarez,1982)

Com:

H : carga do vertedor;

L : Largura do Vertedor

Os descarregadores (Figura 2.8) podem apresentar diferentes formas e disposições e podem ser classificados de diferentes maneiras o que permitem ter diferentes comportamentos (Azevedo Netto e Alvarez,1982).:

- Pela *forma*, podem ser considerados *simples* (retangulares, trapezoidais, triangulares, etc) ou *compostos* (secções combinadas);
- Pela *altura relativa da soleira*, podem ser considerados como *descarregadores completos ou livres* se $p > p'$ ou como *descarregadores incompletos ou afogados* se $p < p'$;
- Pela *largura relativa*, podem ser definidos como *descarregadores sem contração lateral* se $L=B$ ou como *vertedores contraídos* se $L < B$ com uma ou duas contrações ou se a largura for menor do que o canal de acesso.

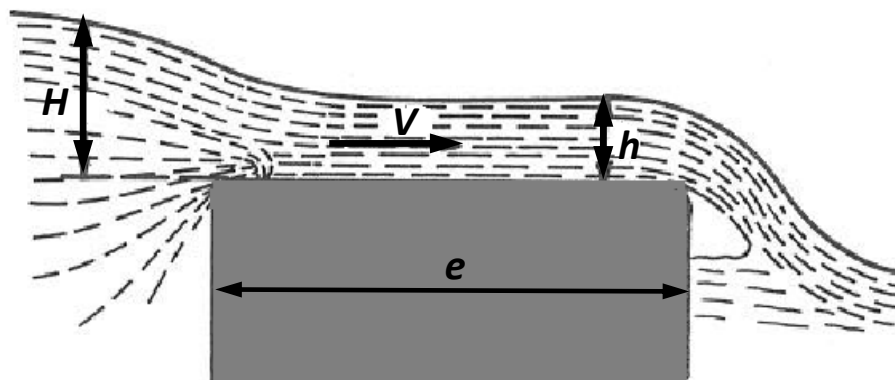


Figura 2.8 – Esquema de um Descarregador (Fonte: Azevedo Netto e Alvarez,1982)

- Pela *natureza da parede*, podem ser designados como *descarregadores em parede delgada* através de chapas ou madeira chanfrada, se o contacto da veia líquida descarregada com a parede limita a uma aresta cortada em bisel (Quintela, 2007) ou como *descarregadores em parede espessa* se a sua espessura é maior $0.66H$;

A lâmina descarregada sofre contração quando ocorre um desvio brusco no contacto com o descarregador. Verifica-se a contração lateral quando o contorno do descarregador se encontra afastado das paredes laterais do canal a montante, havendo um brusco desvio lateral da lâmina na aproximação para o descarregador

Num descarregador a toda a largura do canal, a contração limita-se à parte inferior e assim não ocorre contração lateral (Quintela, 2007).

2.4. Estudos feitos sobre Caixas de Visita

Carvalho e Leandro (2010) desenvolveram um estudo com o objetivo de avaliar o escoamento a jusante de uma caixa de visita com uma comporta de controlo, apenas para uma configuração da caixa de visita e para diferentes aberturas de comporta. Investigaram também os efeitos do jato livre a montante da caixa de visita tais como a turbulência, a dissipação de energia e regimes de escoamento.

Segundo Chanson, (2004) a zona de impacto do jacto define três regimes de escoamento, dependendo do caudal e da configuração da caixa de visita. Se o jacto atingir o colchão de água tem-se regime R1; se atingir a zona de saída de água, R2 e se atingir a zona acima da saída de água, tem-se um regime R3.

Com o intuito de distinguir os três Regimes desenvolvidos por Chanson, (2004), Christodoulou, (1991) definiu um número de Impacto (Equação 21) com base na trajetória do jacto através da Equação 20.

$$y = y_0 + (x - x_0)\tan \alpha + \frac{g}{2 V_0^2 \cos \alpha^2} (x - x_0)^2 \quad (20)$$

$$I = \left(\frac{2S}{g}\right)^{0.5} \frac{V_0}{D_M} \quad (21)$$

O número de Impacto depende das características do fluxo a montante tais como:

- a altura cinética $\left(\frac{V_0^2}{2g}\right)$;
- a geometria da caixa de visita, relacionada com a altura adimensional da caixa $S = \frac{S}{D_M}$, em que g representa a aceleração gravítica.

De acordo com Granata et al., (2011) os regimes definem-se da seguinte forma:

- R1 se $I < 1$;
- R2 se $1 \leq I \leq 1.5$;
- R3 se $I > 1.5$

Por forma a considerar a influência da abertura da comporta (h_0) e da altura do colchão de água na caixa de visita (h_m), Carvalho e Leandro, (2010) desenvolveram dois novos números de Impacto, I^* e I^{**} (Equações 21 e 22), alargando, desta forma, a classificação dos regimes de escoamento.

$$I^* = \left(\frac{2(s - h_0)}{g} \right)^{0.5} \frac{V_0}{D_M} \quad (22)$$

$$I^* = \left(\frac{2(s - h_m)}{g} \right)^{0.5} \frac{V_0}{D_M} \quad (23)$$

Através da Figura 2.9 é possível visualizar a correspondência entre a zona de impacto do jacto e os dois novos números de Impacto.

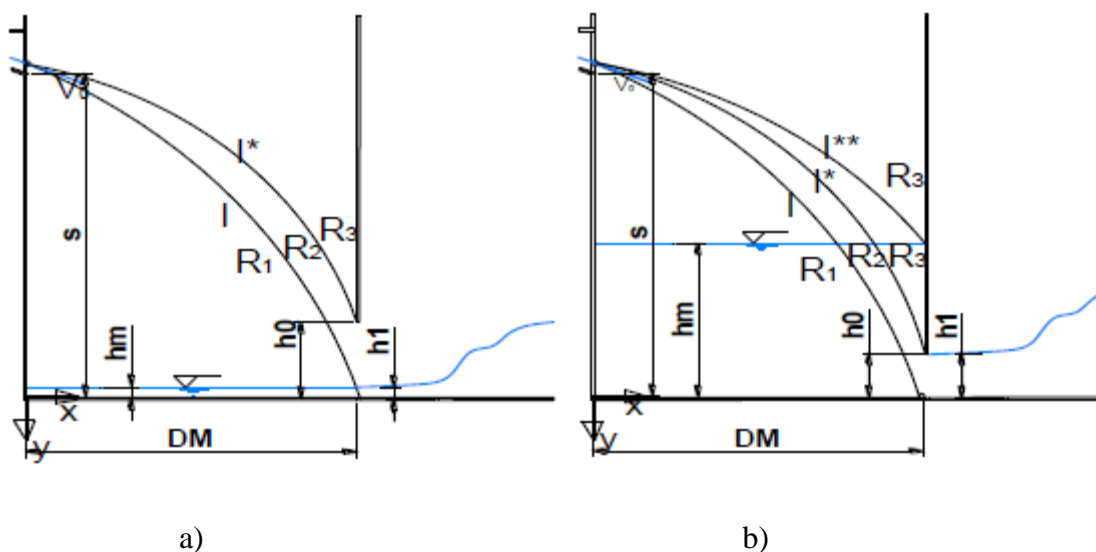


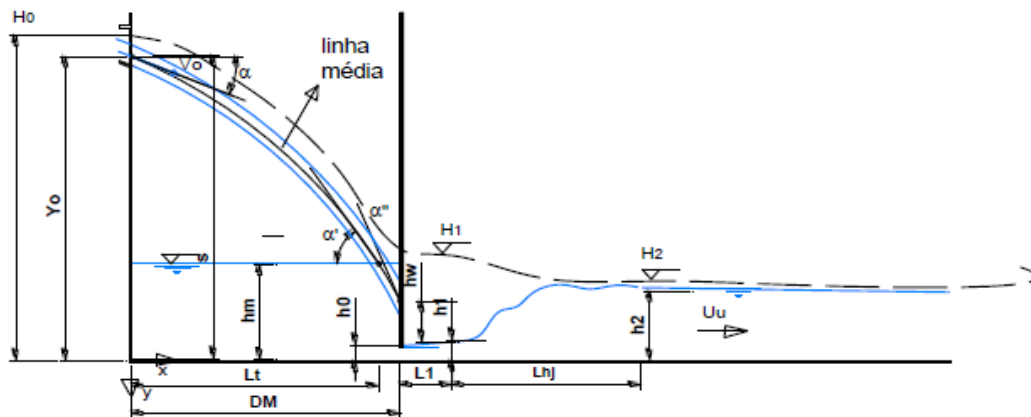
Figura 2.9 – Regimes definidos pela zona de impacto do jacto e pelos seus limites relativamente às diferentes alturas do colchão de água: a) altura do colchão de água inferior à abertura da comporta; b) altura do colchão de água superior à abertura da comporta.

(Fonte: Carvalho e Leandro, 2010)

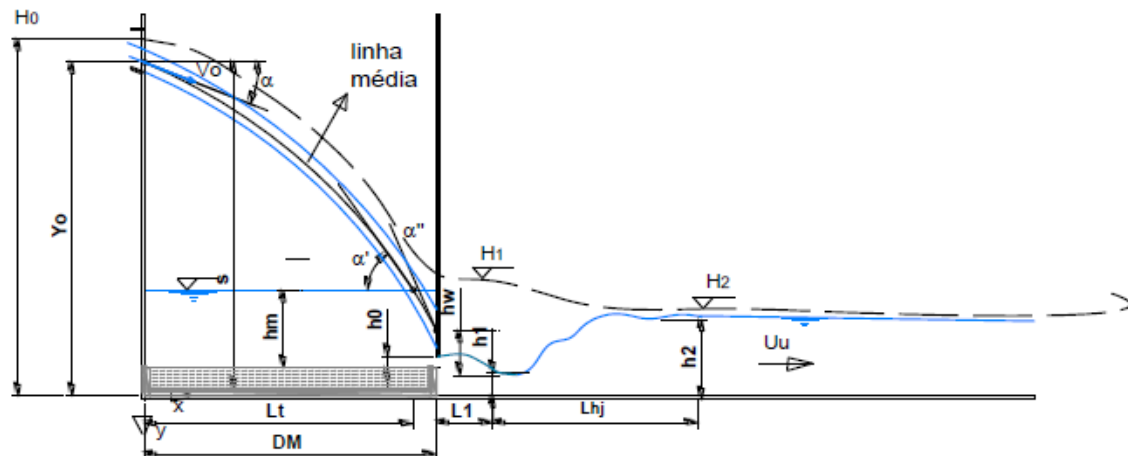
Com base na classificação feita por Chanson, (2004) e desenvolvida por Carvalho e Leandro, (2010), é possível definir-se os regimes de acordo com os novos números de Impacto I^* e I^{**} :

- Regime 1 ($R1$) se $I < 1$ em que o jacto ou atinge o fundo da caixa de visita ou no interior do colchão de água;
- Regime 2 ($R2$) se $I \geq 1$ e $I^* \leq 1$ em que o jacto ou atinge diretamente a zona a jusante da caixa de visita ou depois de atravessar o colchão de água;
- Regime 3 ($R3$) se $I^* > 1$, quando o jacto não é influenciado pelo colchão de água, e $I^{**} > 1$, quando o jacto é influenciado pelo colchão de água e atinge diretamente a comporta.

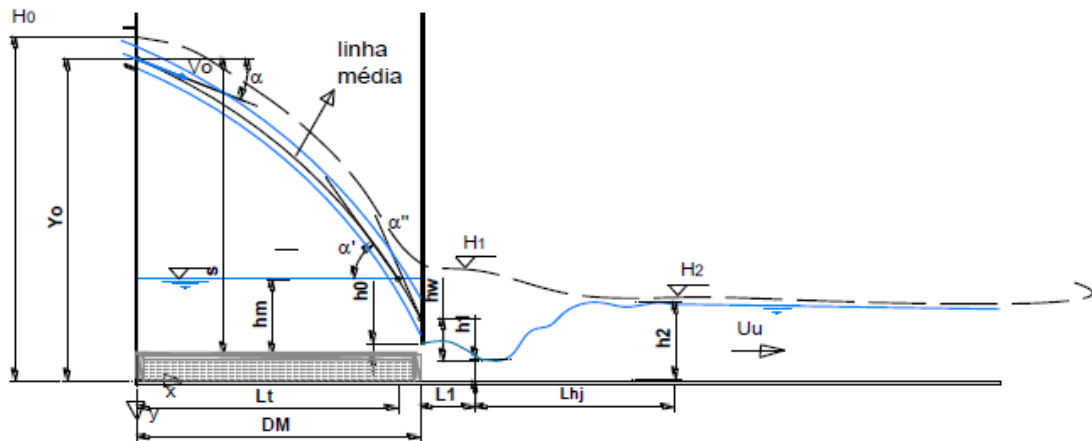
Joana Querido, (2011) estudou os coeficientes de vazão e a dissipação de energia do escoamento numa caixa de visita de queda livre com planta quadrada, para diferentes aberturas de uma comporta a jusante e relacionou-os com os diferentes regimes. Para simular as diferentes geometrias de saída da caixa de visita, construiu-se e instalou-se uma caixa de acrílico de $0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 0.5\text{cm}$, dispondo-a em três posições diferentes, de acordo com a geometria pretendida (Figura 2.10). Aplicou também este estudo para o caso da geometria simples (Figura 2.10 a))



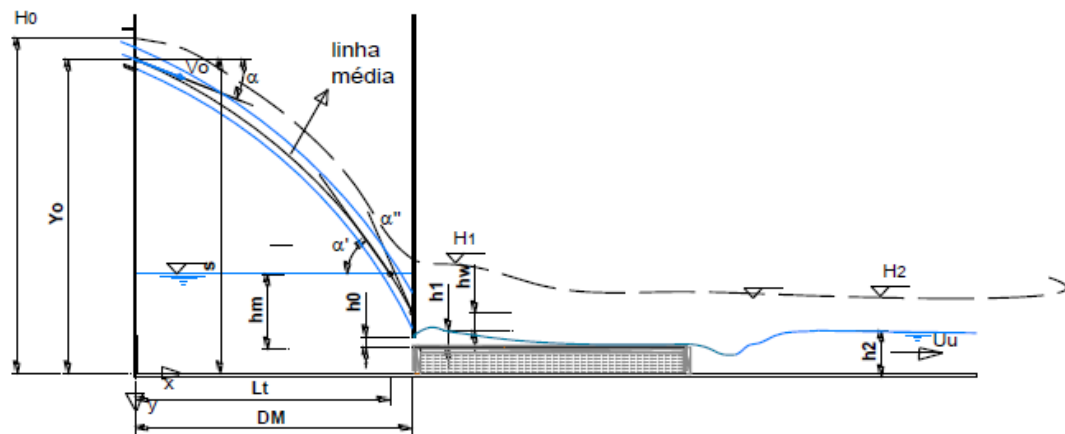
a)



b)



c)



d)

Figura 2.10 - Representação das quatro configurações : a) Configuração 1; b) Configuração 2; c) Configuração 3; d) Configuração 4. (Fonte: Querido, 2010)

2.5. ADV – Acoustic Doppler Velocimetry

O conhecimento do transporte de sedimentos e as previsões da dispersão de contaminantes, assim como da qualidade de água depende da velocidade do escoamento. Os escoamentos turbulentos e as medições das suas velocidades devem ser realizados com elevada frequência a fim de detetar as pequenas variações de velocidade. O equipamento ADV baseado no efeito acústico doppler é concebido para medir as componentes instantâneas de velocidade num único ponto com uma frequência relativamente alta. O ADV pode ainda fornecer valores da concentração de sedimentos em suspensão instantânea (SSC). As experiências efetuadas em laboratório e no campo demonstraram que a metodologia do ADV é uma técnica robusta bem

apropriada para as medições de turbulência em escoamento com superfície livre. A Figura 2.11 ilustra as principais componentes da sonda.

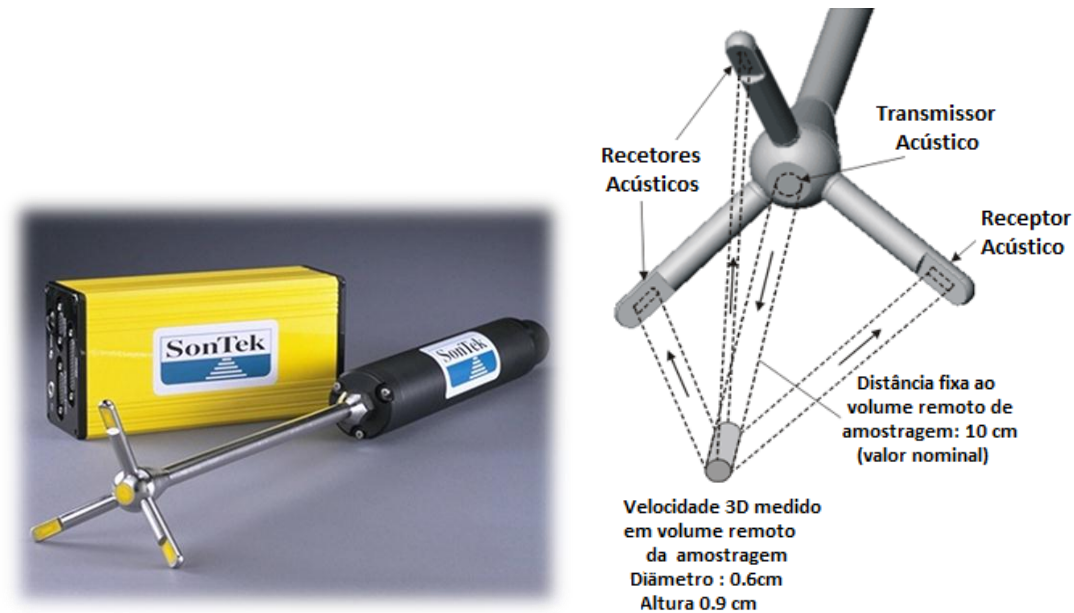


Figura 2.11 – ADV: esquematização do seu funcionamento (Fonte: <http://www.sontek.com>)

A sonda é inserida dentro do escoamento (Figura 2.13) e mede num volume de controle situado a cerca de 5 cm de distância do transmissor da sonda. Este afastamento permite que a medição não seja influenciada pela intrusão da sonda.

O processamento de dados consiste na recolha de valores de velocidade instantânea durante períodos de tempo, geralmente superiores a 10 segundos, e outra informação relativa ao efeito doppler tal como o sinal e sua correlação da emissão e receção bem como calcular estatísticas básicas necessárias para análise da turbulência (Wahl, 2000).

- Os dados podem ser recolhidos e processados usando o software WinADV (Figura 2.12), capaz de ler arquivos *.adv, com as seguintes funcionalidades:
 - Permite a revisão, visual e de uma forma mais prática dos ficheiros ADV após a sua recolha;
 - Simplifica a filtragem dos dados e ajuda na identificação de anomalias causadas pela baixa intensidade do sinal;
- Pode regar arquivos contendo os dados recolhidos a partir de apenas uma sonda, ou de várias sondas ligadas a um conjunto de dados individuais computador de aquisição



Figura 2.12 – Recolha de dados do ADV



Figura 2.13 – Instalação do ADV

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição Geral da Instalação

A área científica de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente apresenta um laboratório (Figura 3.1) com recursos de apoio a trabalhos de investigação com componente experimental, de aulas laboratoriais e de prestação de serviços ao exterior. Nele estão instaladas reservatórios, grupos elevatórios, um canal de ondas, um circuito hidráulico com condutas de 350 mm de diâmetro, e diversos equipamentos de medição (p.ex.: níveis de água e velocidades de escoamento).



Figura 3.1 - Canal multiusos do LHRHA

Todo circuito é fechado e está dividido pelos dois pisos: no primeiro piso encontra-se um reservatório de betão armado com 36 m³ e quatro grupos de eletrobomba que estabelecem a alimentação do circuito conduzindo a água até ao piso superior onde se encontra o reservatório metálico com capacidade de 12 m³. O seu controlo e monitorização é feito na sala de comandos por um Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) que consiste num computador que comunica com um conjunto de instrumentação que faz leituras do estado da rede, em tempo real, e que transmite essa mesma informação para um centro de

controlo dando indicação de diversos parâmetros, tais como o nível de água em reservatórios, as pressões em pontos críticos da rede, o controlo de grupos elevatórios, percentagem de aberturas das válvulas com indicador de posição (Figura 3.2).

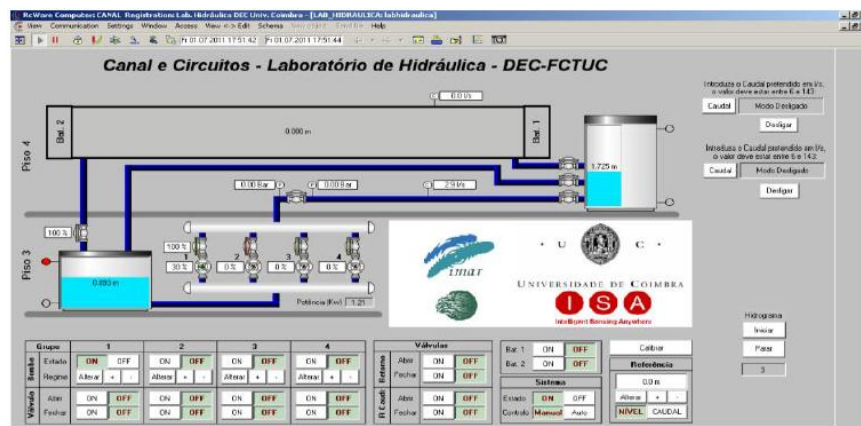


Figura 3.2 - Interface gráfico do sistema SCADA do LHRHA (Fonte: Querido, 2010)

O canal hidráulico é constituído por um suporte em perfis metálicos (INOX) em que o fundo e as paredes laterais são em vidro acrílico e as faixas laterais e o fundo são de vidro. Este apresenta um comprimento de 36m, 1m de largura constante e uma altura variável. No seu interior é apresentado, com 1% de inclinação, outro canal de dimensões 8m x 0.5m x 0.5m, cujas paredes são de acrílico e têm 10 mm de espessura (Martins et al., 2010).

Este recebe um caudal em jacto livre a 0.7 m do fundo, cujo jacto apresenta um ângulo de incidência igual a $\alpha = -35^\circ$ (Carvalho e Leandro, 2010). A saída dá-se sob uma comporta que controla o escoamento com diferentes aberturas e geometrias. A seção da comporta coincide com a seção transversal do canal e é um comando instalado no canal que controla o seu movimento. O estudo é efetuado considerando várias geometrias de saída da caixa de visita com contração lateral (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Representação das comportas para cada configuração e respetivas aberturas h_0

	Configuração nº1	Configuração nº2	Configuração nº3
h_0 (cm)	1.57	4	10 (1/2 altura)
	2	8.8	15 (3/4 de altura)
	3.53	10	20 (altura total)
	6.28	15.7	
	10		

Com base no conjunto de dados experimentais obtidos na caixa de visita, analisam-se as condições do escoamento, coeficiente de vazão e a dissipação de energia. Analisou-se também a velocidade instantânea no canal a jusante.

3.2. Metodologia Experimental

No início do trabalho experimental verificou-se que o jacto à saída não era bidimensional o que não era suposto. Tal é justificado pelo facto da saída deste não estar centrada relativamente ao canal. Por forma a solucionar esta situação tentou-se usar uma rede presa na saída da água mas constatou-se que não era viável. Desta forma, colocou-se uma comporta rotativa com um peso e observou-se a bidimensionalidade do escoamento à saída, como se pode constatar pelas fotografias (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Solução para a bidimensionalidade do fluxo

Efetuuou-se o seguinte procedimento: ligar as bombas através do SCADA, verificar se as válvulas (a do reservatório e a válvula intermédia do circuito que liga o reservatório de baixo ao de cima) estavam sempre na mesma posição, por forma a não influenciar no caudal; tirar 10 fotografias para cada regime e para cada abertura da comporta na Caixa de Visita e a jusante desta para depois fazer uma seleção das 5 fotografias mais representativas relativas a cada configuração e fazer as medições com o ADV, tudo isto para garantir as mesmas condições de escoamento por forma a obter resultados mais precisos.

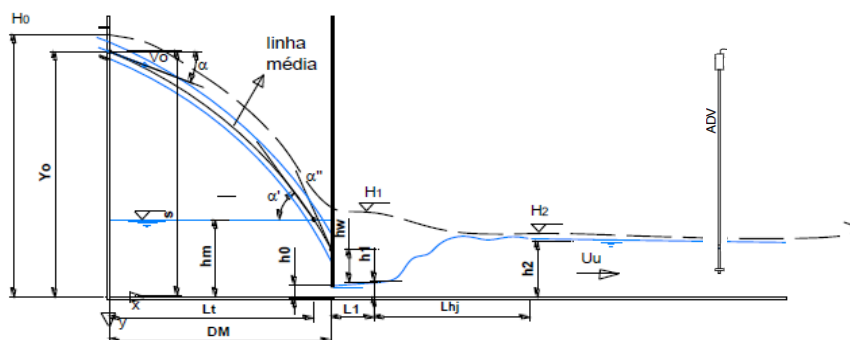


Figura 3.4 – Representação esquemática da caixa de visita (vista lateral) com ADV instalado

Legenda da figura esquemática:

D_M – Comprimento da caixa de visita (0.5 m);

h_0 – abertura da comporta;

h_m – nível de água na caixa de visita;

h_1 – nível de água a jusante da comporta;

h_2 – nível de água a jusante do ressalto hidráulico;

H_0 – energia total no reservatório situado a montante da caixa de visita;

H_1 – energia total na caixa de visita;

H_2 – energia total a jusante do ressalto hidráulico;

L_r – distância horizontal até ao ponto de impacto do jacto;

L_l – distância horizontal desde a comporta até ao início do ressalto hidráulico;

L_{hj} – comprimento do ressalto hidráulico;

s – altura de queda livre da caixa de visita (0.7 m);

x – coordenada horizontal;

y – coordenada vertical;

Y_0 – distância vertical entre o fundo do canal e a linha média do jacto;

α – ângulo entre o início do jacto e a horizontal;

α' – ângulo entre o jacto e o colchão de água da caixa de visita;

α'' – ângulo entre o jacto e a comporta.

Definiu-se uma gama de caudais que varia entre um caudal de 4.43 l/s (regime da bomba de 30%) e um máximo de 12.09 l/s (regime da bomba de 38%). Este último como foi difícil de obter através do tempo de enchimento de um balde de 49 l e dado que apresentava valores díspares, não foi considerado. A cada regime e a cada altura da comporta ao fundo do canal, utilizando uma máquina fotográfica Sony α 350, modelo DSLR-A350x equipada com uma lente DT 18-70mm/F3.5-5.6, com menos de 0.1% de distorção (Carvalho e Leandro, 2010) e F/6.3 com 1/125 s de exposição e uma Canon Ixus 105, sem flash com 10 flash/ s, ambas fixas em tripés, tiraram-se dez fotografias à caixa de visita, à zona a jusante. Dessas dez fotografias para cada situação, fez-se uma seleção das cinco mais representativas e dessas cinco fez-se a sua análise em Autocad por forma a medir a altura média do colchão de água na caixa de visita e a jusante da caixa de visita mediu-se o nível da água a jusante da comporta e altura máxima do ressalto hidráulico. A altura do colchão de água foi definida pela média das alturas em pontos espaçados de 0.5m.

3.3. Metodologia de Cálculo

3.3.1. Definição das alturas h_0

As aberturas da comporta h_0 variaram de forma diferente conforme a configuração e a sua determinação teve por base a relação entre as áreas a partir das aberturas da configuração nº3 (seção de saída de geometria circular) cujas aberturas eram de: 20 cm para altura total livre, 10cm para meia altura livre e 15 cm para $\frac{3}{4}$ de altura total.

3.3.2. Cálculo de Coeficientes de Vazão

A análise das alturas do nível de água tanto a montante como a jusante da comporta assim como o reconhecimento entre condição de orifício ou descarregador com as respectivas fórmulas de cálculo foram elementos fundamentais para o cálculo do valor de coeficiente de vazão.

A condição que permite diferenciar uma situação de orifício de uma situação de descarregador é a relação entre o nível média do colchão de água na caixa de visita, h_m e a altura de abertura da comporta relativamente ao fundo do canal, h_0 . Deste modo tem-se que:

- Para $h_m > h_0$, trata-se de uma situação de orifício;
- Para $h_m < h_0$, trata-se de um descarregador.

Os orifícios são caracterizados por serem de pequenas dimensões com uma geometria rectangular cuja área é definida por $A=Bxh_0$, sendo B a largura da comporta e h_0 a altura de abertura da comporta que é variável, de parede delgada e de contração incompleta. Relativamente à sua posição, o orifício pode ser:

- *orifício livre*, e o coeficiente de vazão é determinado através da equação (Quintela, 1981):

$$Q = CA\sqrt{2gh} \quad (24)$$

em que h corresponde à carga acima do eixo de gravidade do orifício;

- *parcialmente submerso*, e o coeficiente é determinado baseando-se na equação (Lencastre, 1972):

$$Q = C1b(h3 - h2)\sqrt{2gh2} + \frac{2}{3}Cb\sqrt{2g}\left(h2^{\frac{3}{2}} - h1^{\frac{3}{2}}\right) \quad (25)$$

Neste trabalho, para o cálculo do coeficiente de vazão quando se está perante uma situação de descarregador, usa-se a seguinte equação:

$$Q = CL\sqrt{2gh^3} \quad (26)$$

Em que h é a carga tal como indica a Figura 3.5 e L corresponde à largura do canal, 0.5 m.

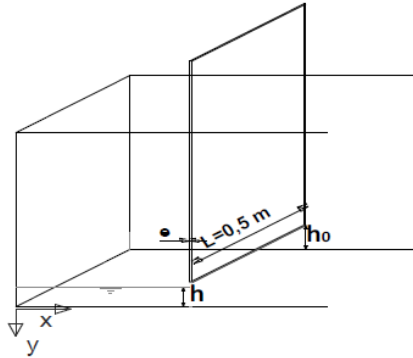


Figura 3.5 – Situação de descarregador para $h < h_0$ (Fonte: Querido, 2011)

3.3.3. Cálculo da energia de dissipação

Quando a velocidade do escoamento é elevada o escoamento tem geralmente excesso de energia e tem um potencial erosivo. Nestes casos deve-se controlar a energia através de dispositivos onde ocorra dissipação de energia, geralmente criando zonas de turbulência, como ocorre com a queda na caixa de visita.

A dissipação de energia que ocorre na caixa de visita com queda foi dividida em três tipos de dissipação de energia:

- 1) **Dissipação de energia devido à queda livre na Caixa de Visita** determinada pela diferença de nível entre o reservatório a montante da Caixa de Visita e a altura média de água na Caixa de Visita:

$$\eta q = \frac{H_0 - H_{10}}{H_0} \quad (27)$$

O parâmetro H_0 foi calculado com base na profundidade da água no reservatório a montante relativamente à base da caixa de visita; H_1 foi baseado no teorema de Bernoulli através da seguinte fórmula:

$$H_1 = z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (28)$$

Este tipo de dissipação de energia foi difícil de estimar devido à dificuldade de medição da altura de água na caixa de visita pelo facto de haver uma grande instabilidade na superfície do colchão de água. Acresce que o campo de velocidades não sendo desprezável e não sendo possível calcular não foi considerado. Assim assumiu-se que H_1 corresponde à altura média hm do colchão de água na caixa de visita.

2) Dissipação de energia devida ao ressalto hidráulico:

$$\eta_{rh} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (29)$$

O parâmetro H_2 foi calculado com base no teorema de Bernoulli através da seguinte fórmula:

$$H_2 = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (30)$$

Onde

- v_2 corresponde à velocidade determinada a jusante do ressalto hidráulico;
- h_2 corresponde ao nível de água a jusante do ressalto hidráulico;
- z_2 é nulo pelo facto do eixo de referência estar definido na superfície do fundo do canal.

3) Dissipação de energia total:

$$\eta_T = \frac{H_0 - H_2}{H_0} \quad (31)$$

Sendo que:

η_q = dissipação de energia devida à queda na Caixa de Visita;

η_{rh} = dissipação de energia devida ao ressalto hidráulico;

η_T = dissipação de energia total;

H_0 = energia total no reservatório que está instalado a montante da Caixa de Visita;

H_1 = energia total na Caixa de Visita;

H_2 = energia total a jusante do ressalto hidráulico.

3.3.4. Intensidade da turbulência a jusante da comporta

A fim de quantificar a intensidade da turbulência do escoamento a jusante da comporta para a cada gama de caudais e para cada configuração da comporta usou-se o ADV. Esta é estudada em termos do máximo da velocidade normalizada (Carvalho e Leandro, 2010).

Tendo em conta as recomendações dos fabricantes, é necessário ter-se alguns cuidados durante a realização dos ensaios. De acordo com o fabricante (Sontek, 2001), para além da existência de ruído branco no sinal, inerente ao processo de medição, há outras condições do escoamento

como o arejamento e a turbulência elevada que podem prejudicar o sinal sendo recomendado a aplicação de um filtro ao conjunto de dados (Sanagiotto, Pinheiro et al., 2011).

O *Movimento Turbulento* é caracterizado pela presença de vórtices em movimento no escoamento, com dimensões muito variáveis e com distribuição irregular no espaço e sem periodicidade. Os vórtices dão origem a sobreposição de movimentos secundários, de caráter aleatório (Quintela, 2007) em que a velocidade apresenta componentes transversais ao sentido do fluido.

A avaliação de parâmetros de turbulência do escoamento pode ser obtida a partir das flutuações das velocidades. A magnitude do vector velocidade (instantânea ou média) em cada ponto pode ser calculada através:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (32)$$

Onde V_x , V_y e V_z são as componentes cartesianas (x , y e z , respectivamente). As velocidades instantâneas podem ser utilizadas para estimar parâmetros turbulentos.

As flutuações da velocidade são definidas pelas:

- Tensões normais (de acordo com o referencial cartesiano, x , y e z , respectivamente):

$$\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2} \quad (33)$$

- Tensões tangenciais (normais (de acordo com o referencial cartesiano, x , y e z , respectivamente):

$$\overline{v'w'}, \overline{w'u'}, \overline{u'v'} \quad (34)$$

- Energia Cinética Turbulenta:

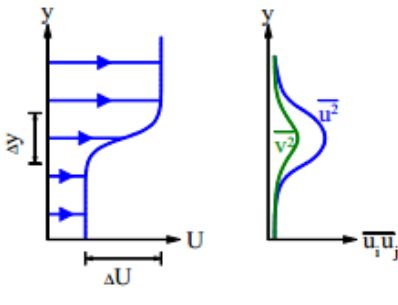
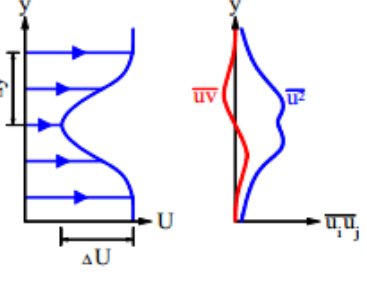
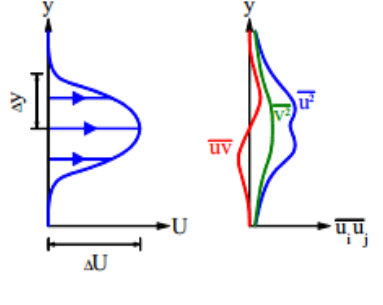
$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (35)$$

- Intensidade da turbulência:

$$IT = \frac{\text{"root mean square fluctuation"}}{\text{mean velocity}} = \frac{u'_{max}}{U} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U} \quad (36)$$

Os escoamentos livres (David Apsley, 2013) são caracterizados de acordo com as representações gráficas, indicadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2– Comportamento dos diferentes escoamentos livres

“Mixing Layer”	“Wake” (plane or axisymmetric)	“Jet” (plane or axisymmetric)
		

É de acordo com as bases implícitas na equação 31 que se recolhe a informação no WinADV (Figura 3.6), após a devida filtragem, por forma a caracterizar-se a intensidade da turbulência do escoamento.

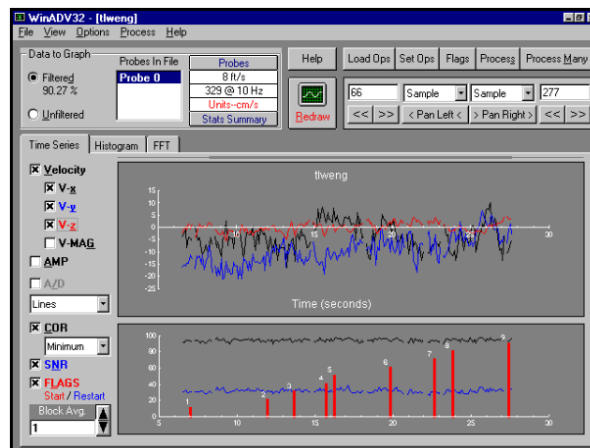


Figura 3.6 – Interface do WinADV (Fonte: <http://www.usbr.gov>)

O ADV foi colocado em três posições transversais ao canal, A, B e C, e fez-se as medições para toda a gama de caudais e para as 3 geometrias da comporta de saída durante 5min (300s). A posição do ADV teve que ser definida para que apanhasse o sinal. Colocou-se o ADV a uma distância de 6.5 a 9 cm do fundo do canal por ser a gama de alturas mínimas que este é capaz de captar sinal sonoro. A Figura 3.7 ilustra as diferentes posições do ADV no canal. Deste modo, só a partir do caudal 8.93 l/s é que se pode fazer as medições pois foi partir desse caudal que a sonda conseguia captar as informações necessárias (Quadro 3.3).

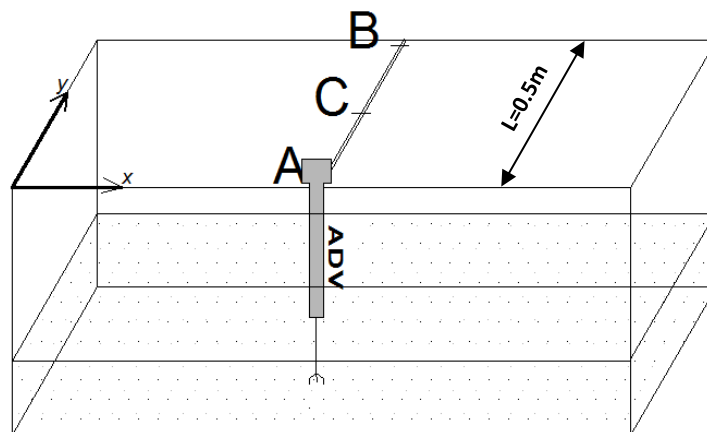


Figura 3.7 – Posições do ADV no canal

O ADV está suspenso numa estrutura que se faz mover num carroto ao longo da linha de A até B. Para cada caudal, para cada configuração e respectivas alturas h_0 ao fundo do canal com aquisições de 300 s em cada ponto (A, B ou C) que são registados no computador, como mostra a Figura 2.9 e posteriormente feita a sua análise através do Software WinADV (Figura 3.6).

Quadro 3.3 – Indicação das posições do ADV no canal

Posição do ADV	Y (cm)
Limite direito do canal	0
A	17.5
B	25
C	32.5
Limite esquerdo do canal	50

No WinADV fez-se uma filtragem dos valores por forma a manter um grande percentual dos dados na amostra, muitas vezes superior a 80% do total.

4. RESULTADOS

4.1. Análise do Coeficiente de Vazão

4.1.1. Configuração nº 1 – Seção igual a toda a largura do coletor

A configuração 1 é referente a uma geometria simples que é definida por uma comporta de 50 cm de largura cuja altura de abertura relativamente ao fundo do canal se faz variar de 1.57 cm a 10 cm, isto é a seção da comporta coincide com a seção transversal do canal e o seu movimento é controlado por um comando instalado no canal (Figura 4.1). A medição da altura média do colchão de água na caixa de visita (a montante da comporta) e a jusante da comporta foi feita para os regimes definidos por uma gama de caudais a variar entre 4.43 l/s a 12.69 l/s.

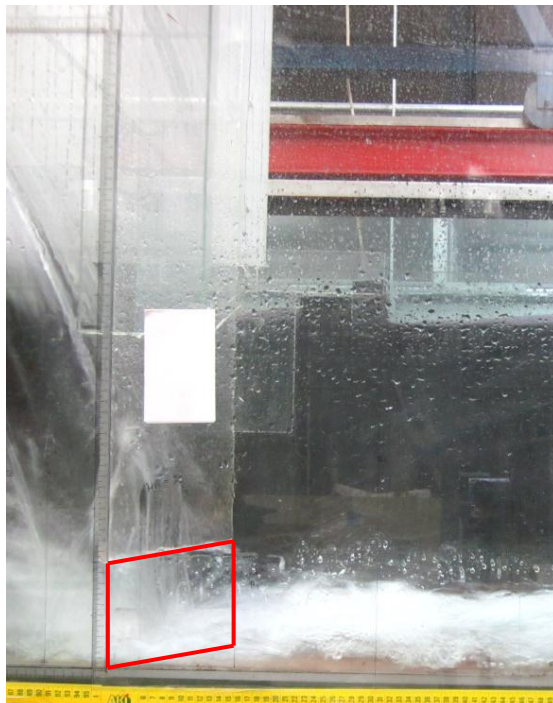


Figura 4.1 – Configuração nº1

1) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)** – Figura 4.2

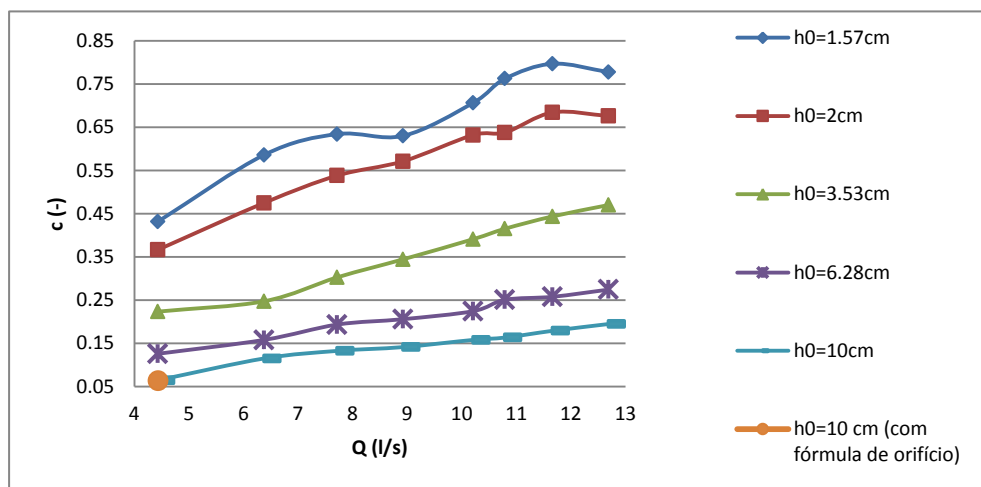


Figura 4.2 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)

Fazendo uma análise detalhada a cada abertura da comporta:

→ para $h_0=1.57\text{cm}$:

- Verificou-se que está-se perante uma situação de orifício em toda a gama de caudais;
- a partir do caudal 6.63 l/s vê-se uma ligeira alteração no comportamento da curva, tal deve estar relacionado com a mudança de regime de R1 para R2/R3;
- entre o caudal 7.72 l/s e e 8.93 l/s há um decréscimo do valor do coeficiente de vazão, que pode ser explicado por uma possível turbulência em redor da comporta;

→ para $h_0=2\text{cm}$:

- trata-se de uma situação de orifício em toda a gama de caudais;
- constata-se um aumento gradual do coeficiente de vazão ao longo de toda a gama de caudais;

→ para $h_0=3.53\text{cm}$:

- tem-se uma situação de orifício em toda a gama de caudais;
- verifica-se um aumento gradual do coeficiente de vazão na série de caudais em causa;

→ para $h_0=6.28\text{cm}$:

- trata-se de uma situação de orifício em toda a gama de caudais;
- é de notar que o crescimento do coeficiente de vazão é gradual pelo facto de em 8 caudais em estudo, o valor do coeficiente varia entre 0.13 e 0.27, sensivelmente.

→ para $h_0=10\text{cm}$:

- no caudal 4.43 l/s (regime 30%) está-se perante uma situação de descarregador que logo transita para situação de orifício nos caudais restantes ;
- o coeficiente vai aumentando de uma forma gradual, à medida que se vai aumentando os caudais.

2) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0)** – Figura 4.3

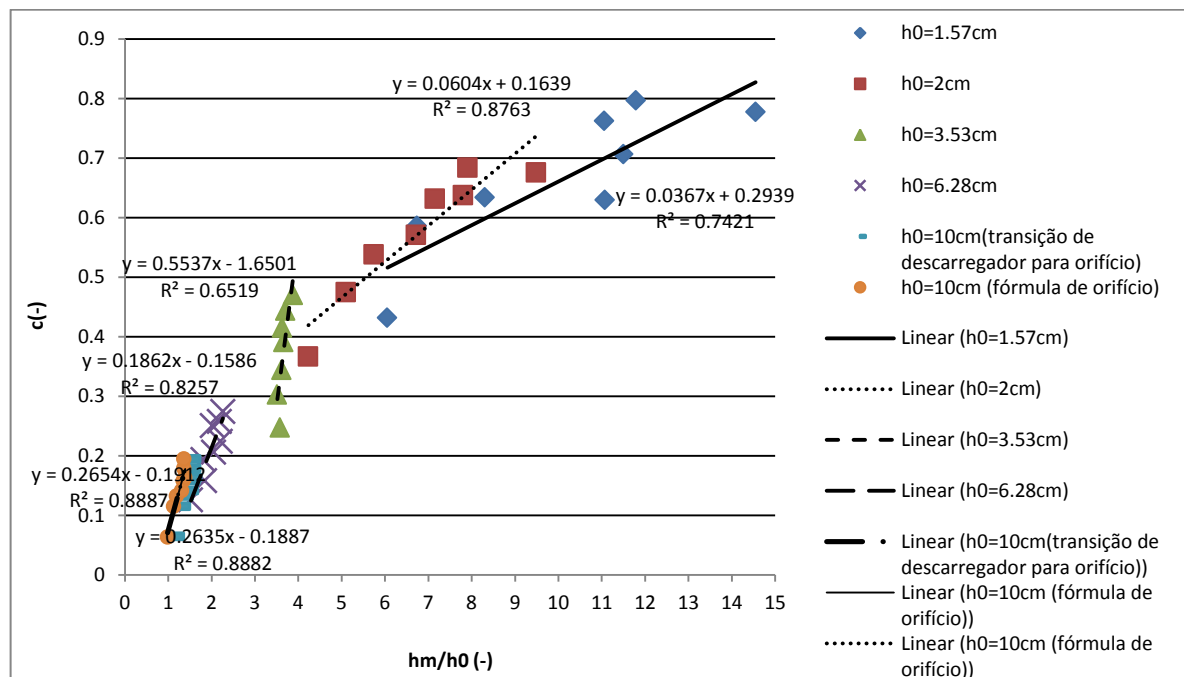


Figura 4.3 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0)

Para as diferentes alturas de abertura da comporta ao fundo do canal fez-se uma aproximação por forma a definir o melhor ajuste relativamente ao coeficiente de vazão. Como se pode notar todas as alturas de comporta definidas tiveram uma correlação razoável excepto para a altura $h_0=3.53\text{cm}$ ($R^2=0.65$)

Também é de realçar a influência da altura de abertura da comporta nos valores de coeficiente de vazão. Quanto menor for a abertura da comporta ao fundo do canal, maior será o nível de água na caixa de visita (adimensional h_m/h_0) e como tal são apresentados valores de coeficiente de vazão maiores.

Como para uma altura de abertura da comporta de $h_0=10\text{cm}$ tem-se uma transição de situação de descarregador para uma situação de orifício, traçou-se a reta de regressão relativa à

transição da situação de descarregador para a situação de orifício e a reta de regressão com a aplicação da fórmula de orifício e comprovou-se que as duas aproximações são praticamente iguais cujo o coeficiente de correlação apresenta um bom valor.

3) **Relação caudal (Q) parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0)** – Figura 4.4

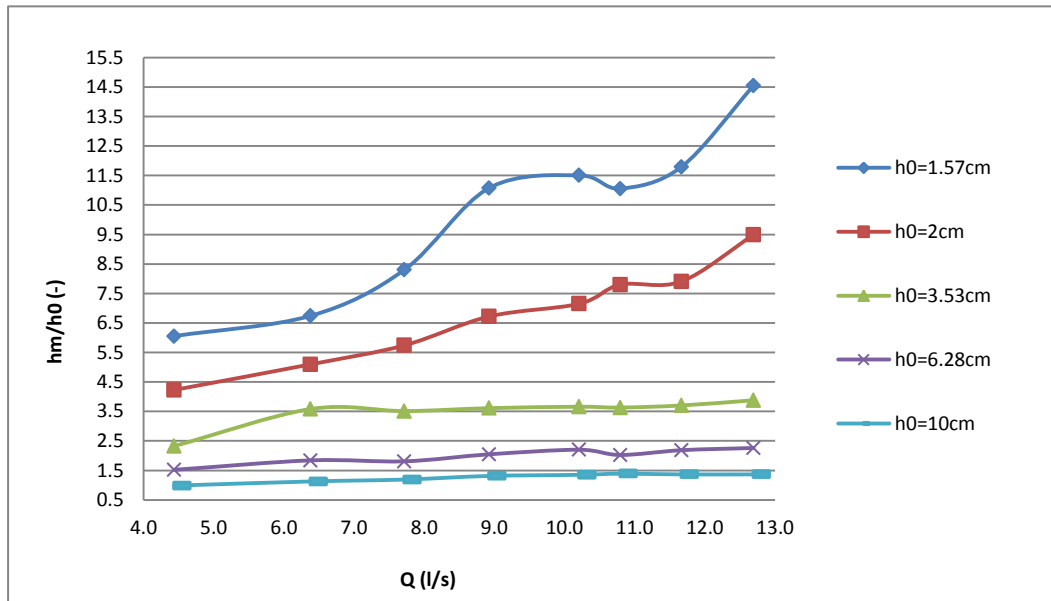


Figura 4.4 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0) e o caudal (Q)

Mediante a análise Figura 4.4 é de comprovar que:

- para $h_0=1.57\text{cm}$ o nível de água na caixa de visita adimensional (h_m/h_0) tende a aumentar gradualmente com o aumento do caudal apesar de algumas variações;
- para $h_0=2\text{cm}$ há um aumento gradual do nível de altura de água adimensional (h_m/h_0) com o aumento do caudal;
- para $h_0=3.53\text{cm}$ existe uma subida gradual com o caudal notando-se uma subida ligeiramente mais acentuada nos menores caudais;
- para $h_0=6.28\text{cm}$ até ao caudal 7.71 l/s há uma ligeira subida no nível da água que estabiliza, apesar de que entre o caudal 10.20 l/s e o caudal 10.79 l/s há uma ligeira descida do nível da água;
- Para $h_0=10\text{cm}$ o nível de água vai subindo ligeiramente no início.

4.1.2. Configuração nº 2 – Seção quadrada com contração lateral

A configuração nº 2 é referente a uma geometria definida por uma contração lateral, em que no fundo do canal, imediatamente a jusante da caixa de visita acoplou-se 2 placas de 0.15 cm x 0.2 cm, uma em cada extremidade ficando livre uma seção de 0.2 cm x 0.2 cm, em que se vai fazer variar a abertura da comporta ao fundo do canal por intermédio de comando instalado no canal (Figura 4.5).

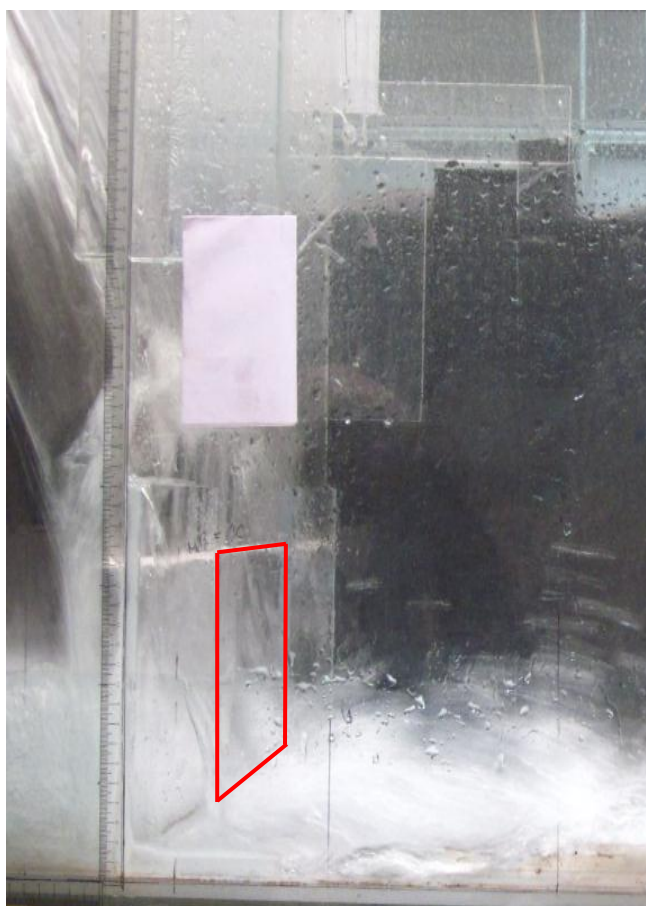


Figura 4.5 – Configuração nº 2

1) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)** – Figura 4.6

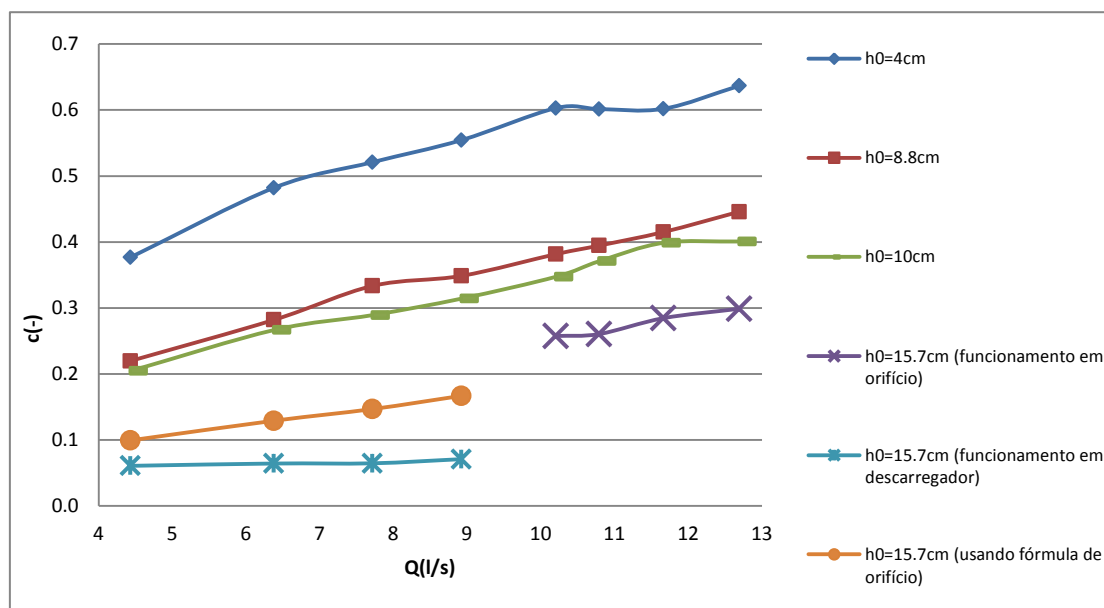


Figura 4.6 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)

Fazendo uma análise mais detalhada a cada abertura da comporta:

→ para $h_0=4\text{cm}$:

- está-se perante uma situação de orifício para toda a gama de caudais;
- observa-se um aumento gradual do coeficiente de vazão ao longo de todo o conjunto de caudais;
- entre o caudal 10.20 l/s e o caudal 11.66 l/s, há um ligeiro decréscimo no valor do coeficiente de vazão que pode estar associado a uma possível turbulência em redor da comporta;
- a partir do caudal 11.6 l/s o valor de coeficiente volta a subir e tal pode ser justificado por estar a ser sujeito ao regime R1

→ para $h_0=8.8\text{ cm}$:

- está representado para todo o conjunto de caudais uma situação de orifício;
- o valor do coeficiente de vazão vai aumentando à medida que se foram aumentando os caudais de estudo;

→ para $h_0=10\text{ cm}$:

- para este caso tem-se uma situação de orifício;
- como seria expectável o valor do coeficiente de vazão aumenta ao logo da gama de caudais;

→ para $h_0=15.7\text{cm}$:

- Dividiu-se o traçado por troços por forma a ser mais fácil a explicação pois está-se perante uma transição de uma situação de descarregador para uma situação de orifício entre o caudal 8.93 l/s e o caudal 10.21 l/s;

- Para os caudais relativos à situação de descarregador, aplicou-se a fórmula do orifício e traçou-se a curva representativa para ver de que forma se enquadrava no contexto e de facto esta curva enquadra-se melhor .

2) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o parâmetro de escoamento adimensional (hm/h0)** – Figura 4.7

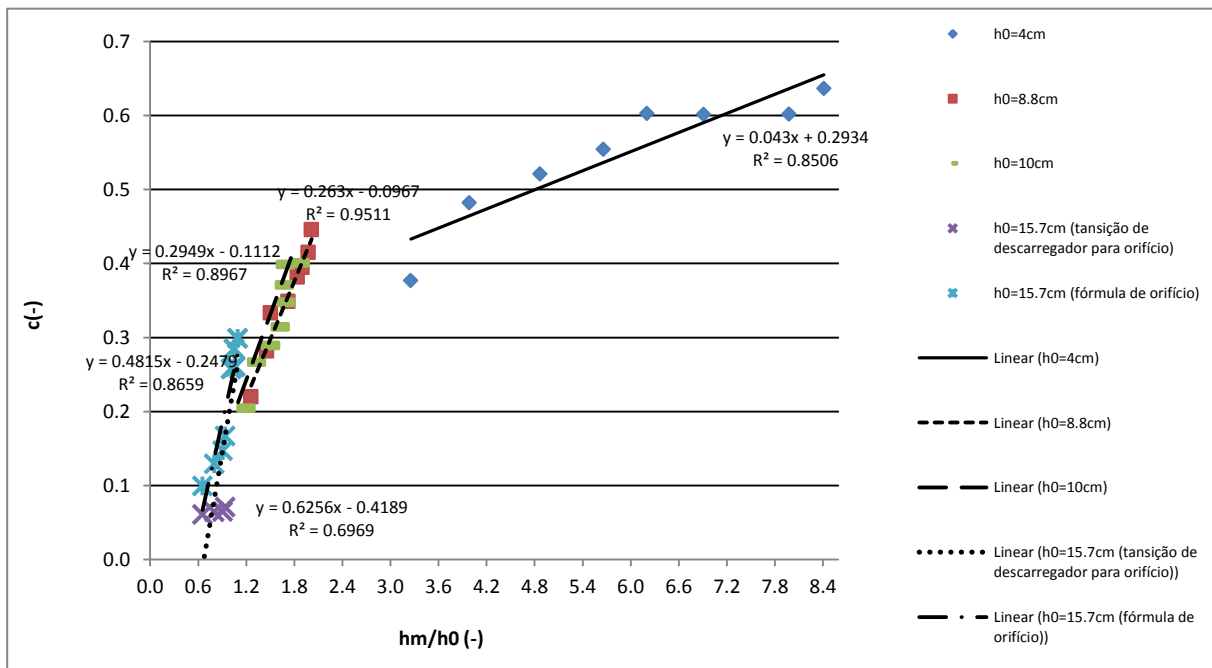


Figura 4.7 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0)

Tal como na configuração nº1, para as diferentes alturas de comporta ao fundo do canal fez-se a aproximação apropriada para se definir o melhor ajuste relativamente ao parâmetro de escoamento adimensional.

De acordo com as regressões lineares obtiveram-se resultados satisfatórios relativamente ao coeficiente de correlação.

A correlação mais alta corresponde à altura de abertura da comporta $h_0=8.8$ cm com $R^2=0.95$.

A correlação mais baixa corresponde à altura da comporta $h_0=15.7$ cm com $R^2=0.69$. Este valor pode ser justificado pelo facto de se estar perante a transição da situação de descarregador para situação de orifício, o que faz com que haja uma discrepância nos valores de coeficiente de vazão. Deste modo, optou-se por se traçar a reta de regressão linear usando os resultados obtidos pela aplicação da fórmula de orifício para esta altura de abertura de

comporta, e verificou-se que o coeficiente de correlação melhorou, adquirindo-se um valor de $R^2=0.86$, o que significa que os valores do coeficiente de vazão aproximam-se mais desta tendência.

Como se pode constatar, há influência da altura de abertura da comporta nos valores de coeficiente de vazão. Quanto menor for a abertura da comporta ao fundo do canal, maior será o nível de água na caixa de visita (adimensional h_m/h_0) e como tal são apresentados valores de coeficiente de vazão maiores.

3) Relação caudal (Q) parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0) – Figura 4.8

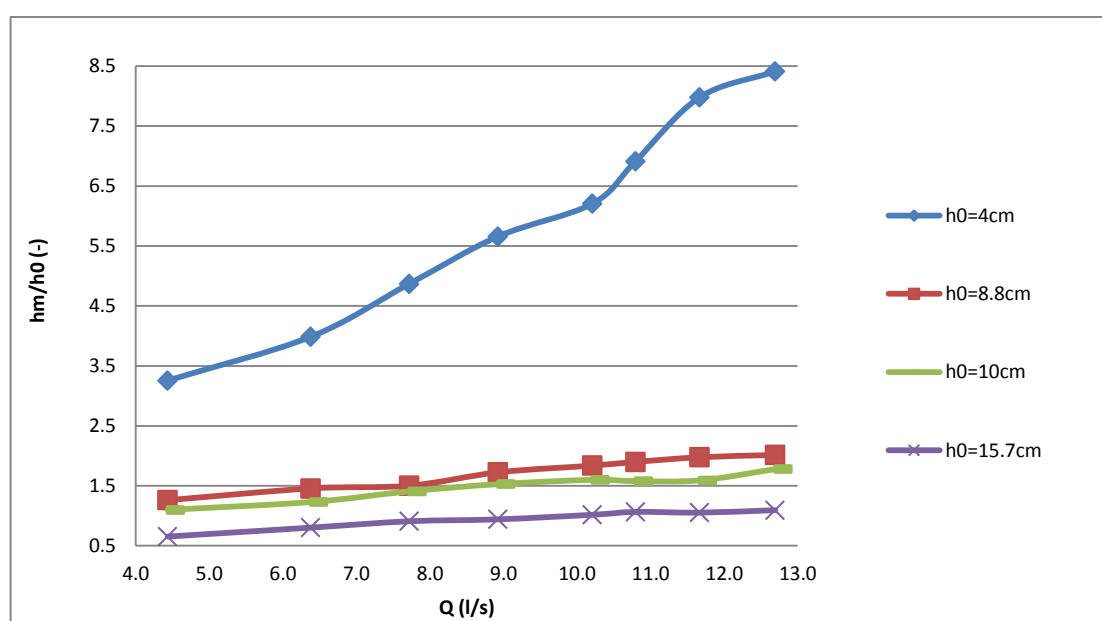


Figura 4.8 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0) e o caudal (Q)

Através da análise Figura 4.8 apresentada, verifica-se que:

- para $h_0=4\text{cm}$, o nível de água na caixa de visita adimensional (h_m/h_0) vai-se elevando gradualmente com o aumento do caudal, apesar de algumas variações;
- para $h_0=8.8\text{cm}$, o nível de água adimensional na caixa de visita vai aumentando lentamente à medida que vão subindo os caudais;
- para $h_0=10\text{cm}$, até ao caudal 6.38 l/s o nível de água na caixa de visita vai aumentado, mas depois a partir desse canal nota-se praticamente uma estabilização do nível de água na caixa de visita até ao caudal 11.6 l/s. de seguida aumenta ligeiramente o nível de água;

- para $h_0=15.7\text{cm}$, o nível de água na caixa de visita vai aumentando lentamente até ao caudal 8.92 l/s e depois torna-se praticamente constante, variando o nível de água entre 1.07 e 1.094
- para $h_0=8.8\text{cm}$, há um aumento gradual do nível de altura de água adimensional (h_m/h_0) com a subida do caudal
- tanto para $h_0=3.53\text{ cm}$, como para $h_0=6.28\text{ cm}$, como para $h_0=10\text{cm}$ o nível de água adimensional (h_m/h_0) na caixa de visita é quase constante para diferentes caudais.

4.1.3. Configuração nº 3 – Seção de saída de geometria circular

A configuração nº 3 é referente a uma geometria definida por uma contração lateral, em que no fundo do canal, imediatamente a jusante da caixa de visita acoplou-se uma placa, com 50 cm de largura, com um orifício circular de diâmetro de 20 cm no centro da placa, onde se vai fazer variar a abertura da comporta que está adjacente a essa placa, por intermédio de comando instalado no canal (Figura 4.9)



Figura 4.9 – Configuração nº3

1) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)** – Figura 4.10

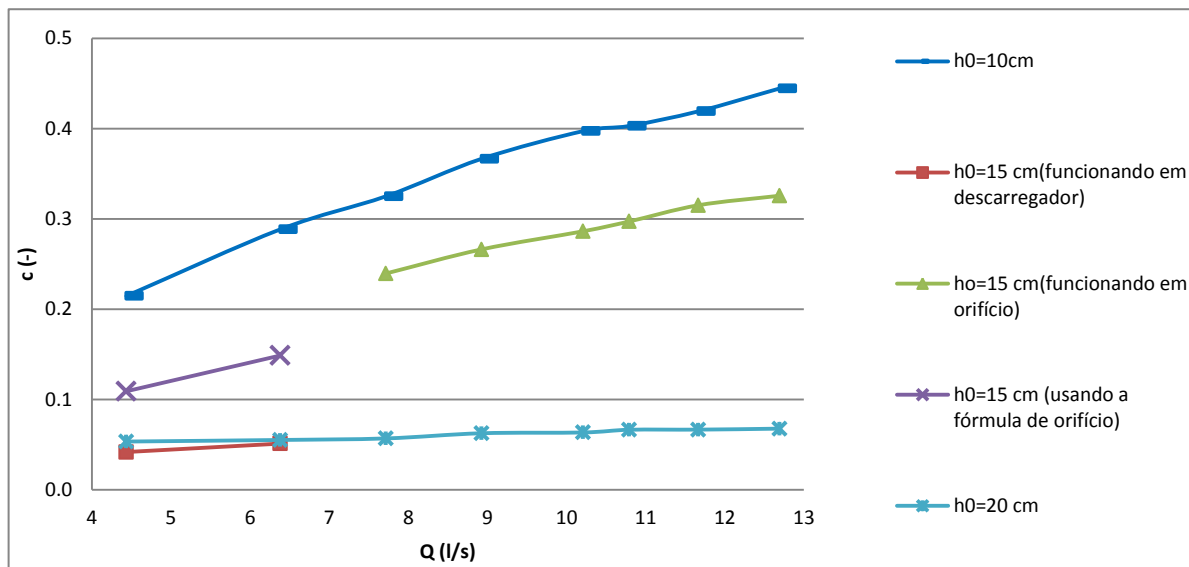


Figura 4.10 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)

Fazendo uma análise mais detalhada a cada altura de abertura da comporta para a 3ª configuração, conclui-se que:

- Para $h_0=10$ cm apresenta-se uma situação de orifício ao longo de toda a gama de caudais e verifica-se que o coeficiente de vazão vai aumentando com o aumento do caudal;
- para $h_0=15$ cm está-se perante uma transição da situação de descarregador para a situação de orifício entre os caudais 6.38 l/s e 7.71 l/s. Deste modo, traçaram-se em separado três curvas referentes à situação de orifício, à situação de descarregador e, para quando se aplica a fórmula de orifício, a fim de se perceber o comportamento em relação ao coeficiente de vazão. Percebe-se claramente que quando se está perante uma situação de descarregador, o valor do coeficiente de vazão é menor do que quando se aplica a fórmula da situação de orifício, e que esta se adequa melhor relativamente aos caudais a partir de 7.71 l/s (inclusive);
- para $h_0=20$ cm tem-se uma situação de descarregador em toda a gama de caudais, e para este caso, a variação de coeficiente de vazão não é significativa variando entre 0.053 e 0.061.

2) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0)** – Figura 4.11

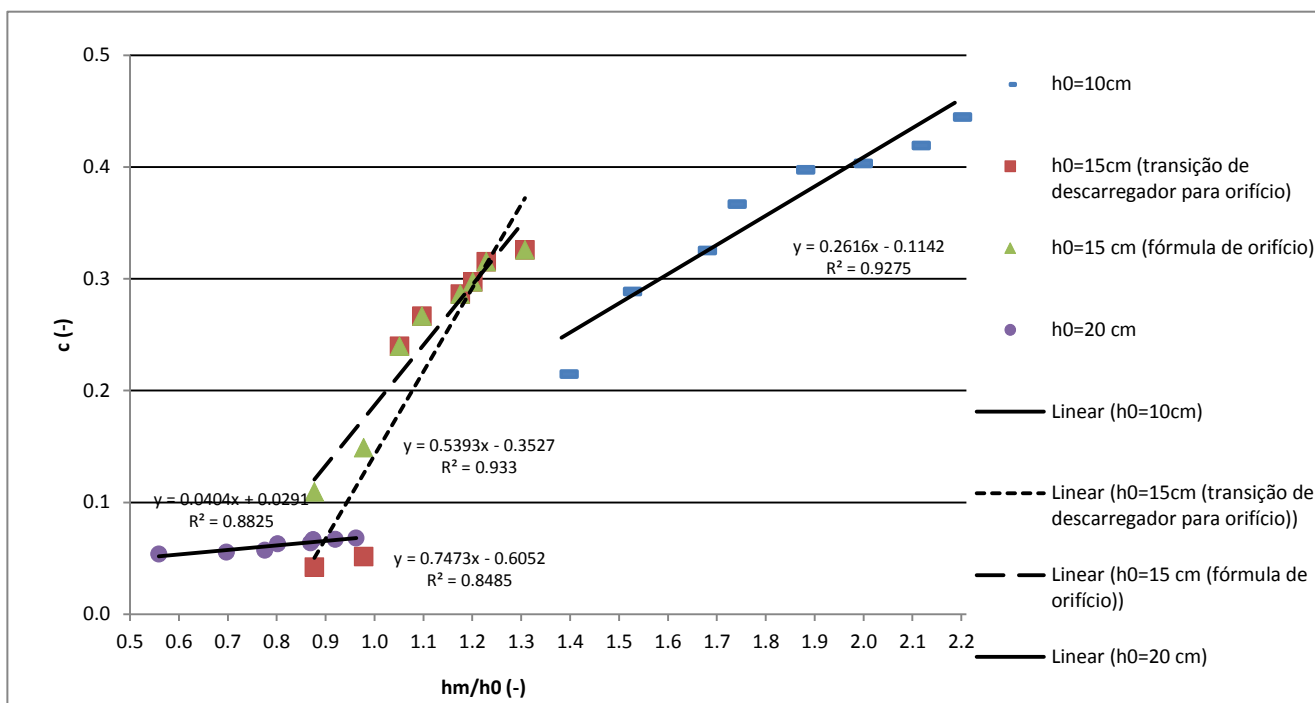


Figura 4.11 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0)

Para a 3ª configuração, como para as anteriores traçou-se correlação de valores entre o nível de água adimensional da caixa de visita e o respetivo valor do coeficiente de vazão para cada altura de abertura da comporta, de modo a perceber qual a melhor tendência.

De uma forma generalizada os resultados obtidos, no que toca ao coeficiente de correlação são satisfatórios. A maior correlação obtida corresponde à altura de abertura da comporta $h_0=10$ com um $R^2=0.92$, apesar de que quando se aplica a fórmula de orifício para a altura de abertura da comporta $h_0=15$ cm, o resultado é bastante satisfatório com um $R^2= 0.93$. Pelo facto de existir a transição da situação de descarregador para a situação de orifício, faz com que haja uma divergência nos valores do coeficiente de vazão, o que por sua vez faz com o coeficiente de correlação seja o mais baixo, com $R^2=0.84$.

Como se pode provar, há influência da altura de abertura da comporta nos valores de coeficiente de vazão. Quanto menor for a abertura da comporta ao fundo do canal, maior será o nível de água na caixa de visita (adimensional h_m/h_0) e como tal são apresentados valores de coeficiente de vazão maiores.

3) **Relação caudal (Q) parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0)** – Figura 4.12

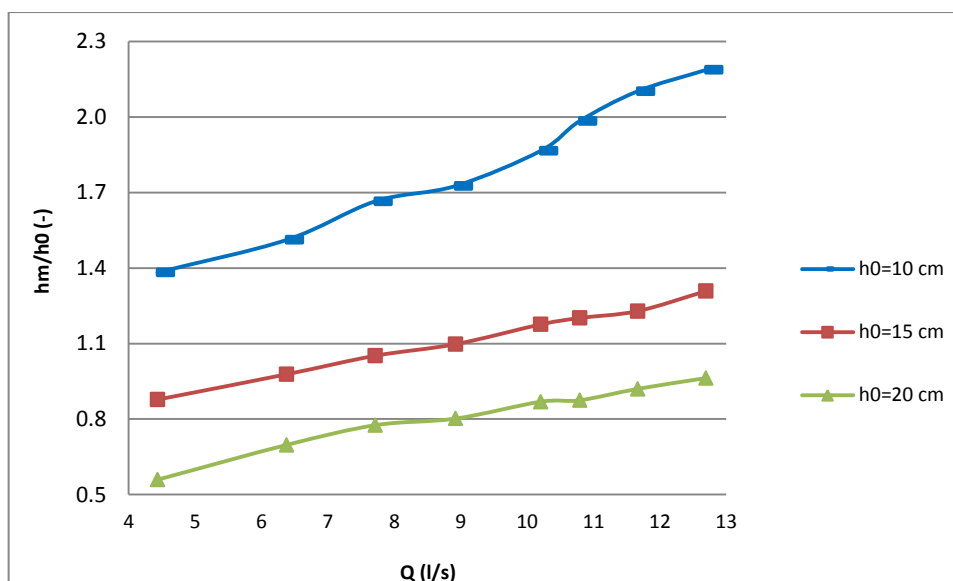


Figura 4.12 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0) e o caudal (Q)

Da análise da Figura 4.12 constata-se que:

- para $h_0=10\text{cm}$, o nível de água na caixa de visita adimensional (h_m/h_0) vai aumentando gradualmente com crescimento do caudal, variando o nível de água na caixa de visita entre 1.38 e 2.18;
- para $h_0=15\text{cm}$, o nível de água vai variando entre 0.87 e 1.30 ao longo de toda a gama de caudais;
- para $h_0=20\text{cm}$, vai havendo uma subida gradual do nível de água adimensional ao longo de todo o conjunto de caudais, variando entre 0.56 e 0.96

4.1.4. Comparação da altura de abertura da comporta comum a todas as configurações ($h_0=10\text{cm}$):

Nas figuras seguintes são efetuadas comparações dos valores de coeficiente de vazão, do nível de água adimensional na caixa de visita e da dissipação de energia relativamente às aberturas “ h_0 ” comuns às três configurações.

1) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)** – Figura 4.13

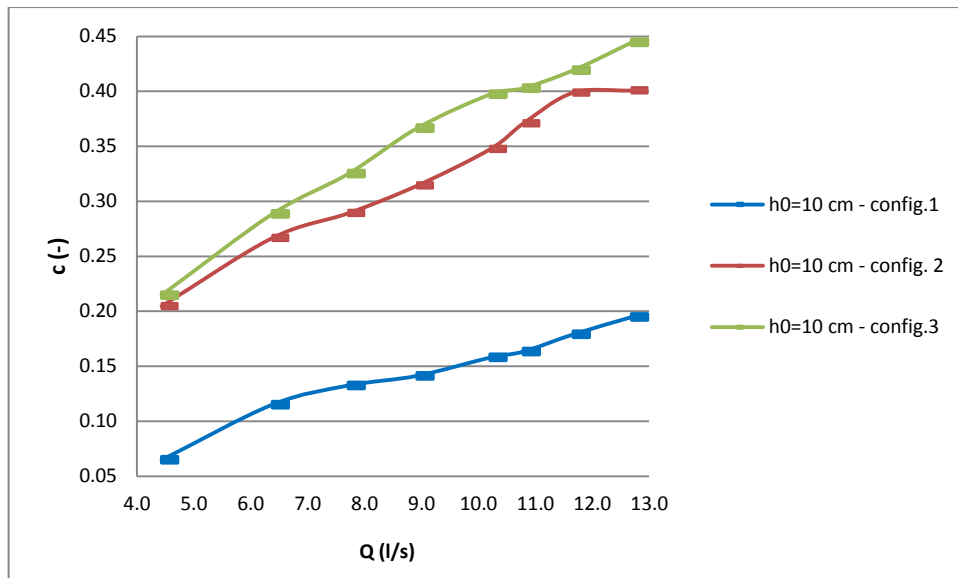


Figura 4.13 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o caudal (Q)

Analisando a altura de abertura de comporta comum às 3 configurações de estudo, $h_0=10$ cm, pode-se constatar que:

- para a configuração nº 1 ou seja, para a seção de saída de água sem contração lateral, caso de geometria simples, para a mesma gama de caudais os valores do coeficiente de vazão tendem a ser mais baixos, variando entre 0.06 e 0.19. Neste caso está-se perante uma transição de situação de descarregador para uma situação de orifício entre os caudais 4.43 l/s e 6.38l/s;
- para a configuração nº 2, ou seja para a configuração que está sujeita à contração lateral com a colocação de duas placas laterais, conclui-se que se trata de uma situação de orifício cujo o coeficiente de vazão vai aumentando entre os caudais 4.43 l/s até 10.79 l/s e depois estabiliza o seu valor de 0.40 nos restantes caudais de estudo;
- relativamente à configuração nº3 em que se tem uma seção de saída de água circular, os valores de coeficiente de vazão são superiores a qualquer uma das outras duas configurações.

2) **Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0)** – Figura 4.14

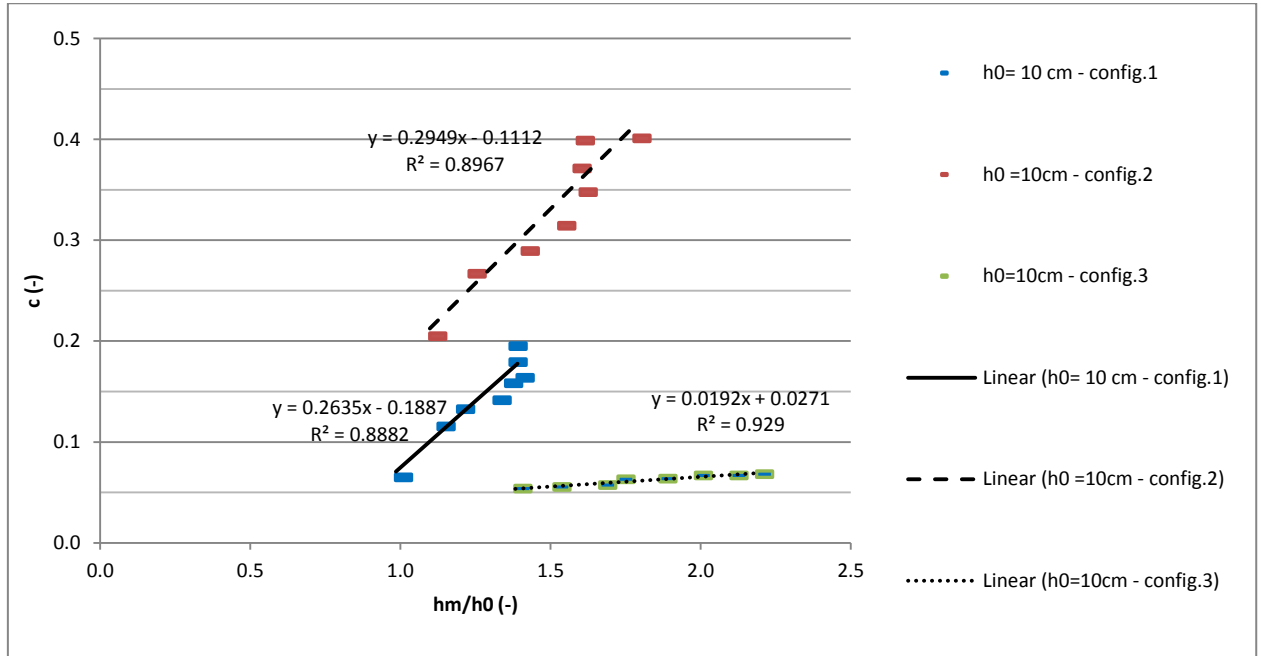


Figura 4.14 – Relação entre o coeficiente de vazão (C) e o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0)

Relativamente às 3 configurações, a melhor tendência que se obteve foi a da configuração nº3 com $R^2=0.92$ apesar de que os valores do coeficiente são mais baixos para maiores níveis de altura de água na caixa de visita. Segue-se a configuração nº 2 com $R^2=0.89$, em que para níveis de água compreendidos entre 1.09 e 1.77 atingem-se valores para coeficientes de vazão compreendidos entre 0.20 e 0.40, respetivamente.

A configuração nº 1, ou seja, a de geometria livre com a seção de abertura toda livre, é a que apresenta uma correlação maior com $R^2=0.88$. Este valor pode ser justificado pelo facto de se estar perante uma transição da situação de descarregador para situação de orifício, que faz com que haja uma ligeira discrepância nos valores de coeficiente de vazão.

3) Relação caudal (Q) parâmetro de escoamento adimensional (h_m/h_0) – Figura 4.15

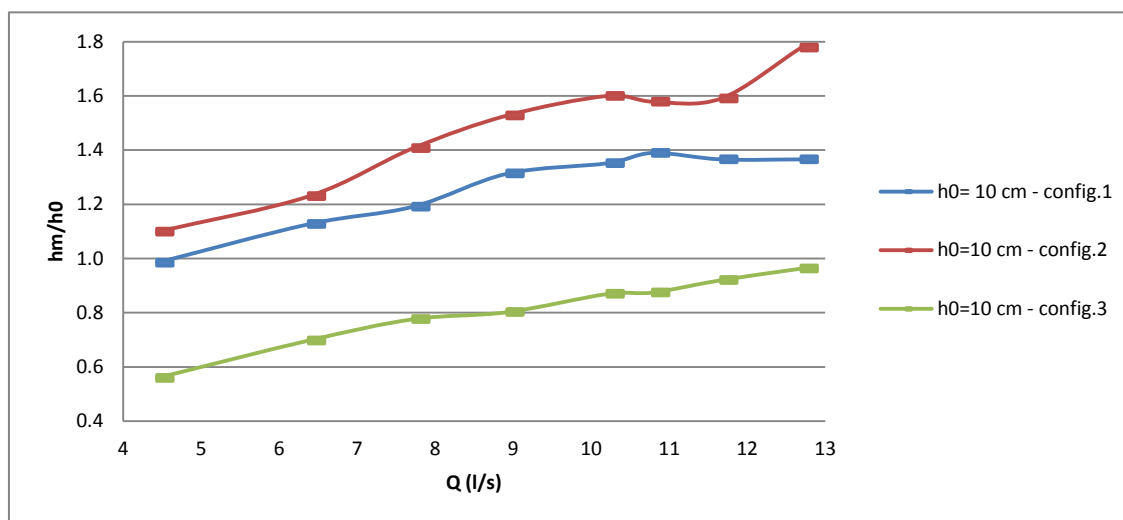


Figura 4.15 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0) e o caudal (Q)

Através do gráfico percebe-se que as diferentes geometrias de saída da caixa de visita com contração lateral têm influência nos níveis de água adimensional na caixa de visita para a mesma gama de caudais. Onde se atingem níveis menores níveis de água é quando se apresenta uma abertura circular na saída da caixa de visita (configuração nº 3), com as características descritas anteriormente. Por sua vez, a 2ª configuração é a que faz com que os níveis de água na caixa de visita sejam maiores, apesar de se notar um decréscimo dos níveis de água entre os caudais 10.20 l/s e 10.79 l/s. A configuração nº1 de geometria simples apresenta níveis de água na caixa de visita compreendidos entre os da 2ª e os da 3ª configuração, havendo um decréscimo do seu valor a partir do caudal 10.79 l/s, mantendo-se depois com níveis constantes para os restantes caudais.

4.1.5. Cruzamento de dados

Tendo em conta que este trabalho experimental foi um seguimento de trabalhos anteriores, achou-se pertinente estabelecer-se algumas relações perante os valores obtidos neste trabalho experimental relativamente aos resultados obtidos em Carvalho e Leandro (2012) e Querido (2011) no que toca às seguintes alturas da comporta ao fundo do canal:

Quadro 3.4 – Aberturas de canal estudadas

h_0 (cm)		
<i>Joana Pião</i>	<i>Querido, (2011)</i>	<i>Carvalho e Leandro, (2012)</i>
1.57	2	2
2	4	3
3.53	6	4
6.28	8	5
10	10	7.5
		10

a) Relação entre as aberturas “ h_0 ”- Figura 4.16

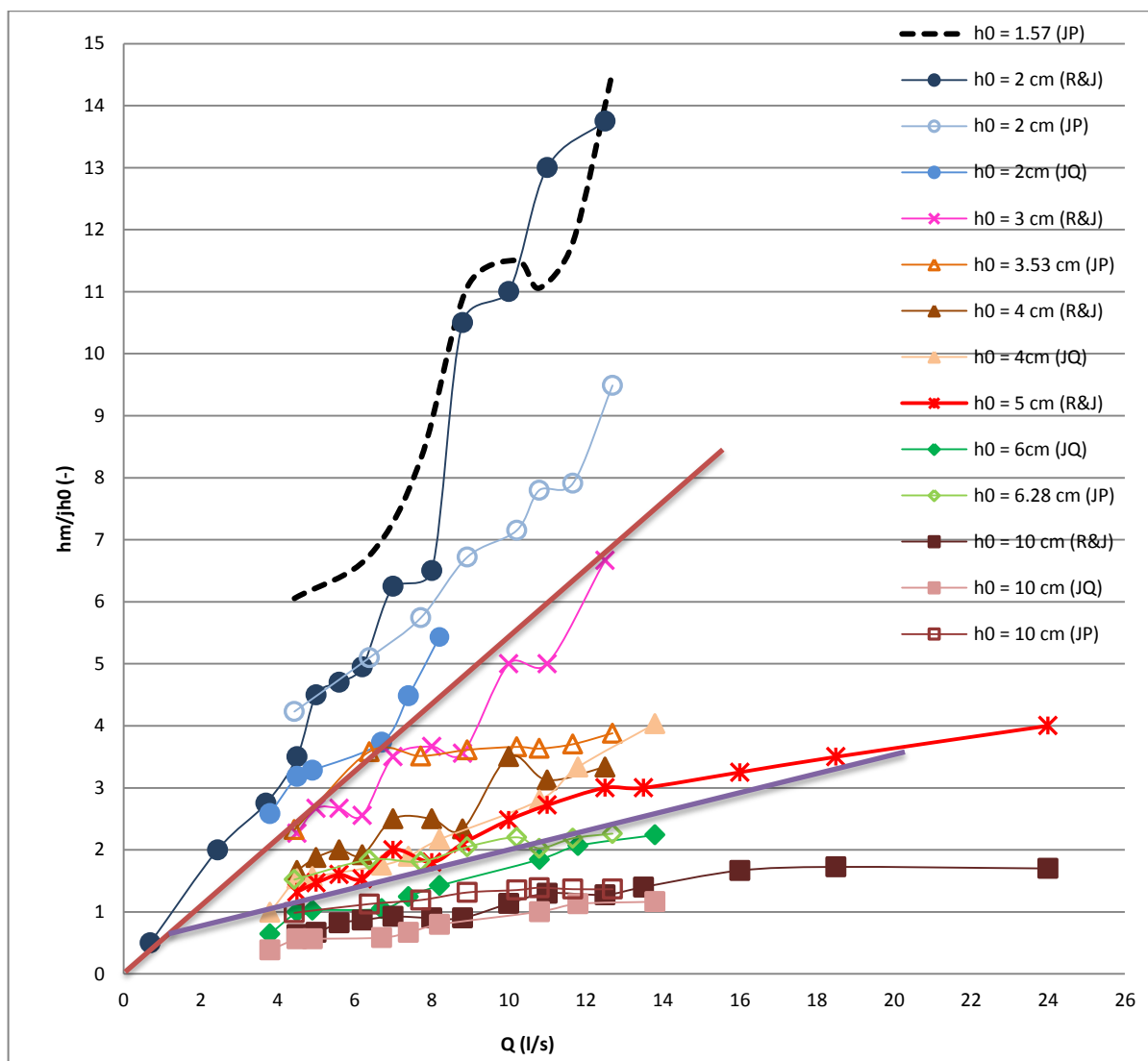


Figura 4.16 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0) e o caudal (Q) para as aberturas “ h_0 ” comuns

Nesta figura, estão representadas as relações entre as aberturas da comporta "h₀" comuns, relativamente aos dados estudados anteriormente por Carvalho e Leandro (2012): J&R e Querido (2011): JQ.

É de notar que as aberturas h₀ comuns são coerentes. A reta a vermelho limita superiormente as aberturas mais baixas (h₀=1.57 cm e h₀=2cm) enquanto que a reta a roxo limita inferiormente as aberturas mais altas.

Para as aberturas da comporta mais baixas, a altura do nível de água na caixa de visita (adimensional h_m/h₀) é maior enquanto que para as alturas da comporta maiores, o nível de água na caixa de visita diminui à medida que se aumenta o caudal.

b) Relação entre as aberturas h₀ relativas às mesmas áreas de saída entre a configuração n°1 e a configuração n°2 – Figura 4.17

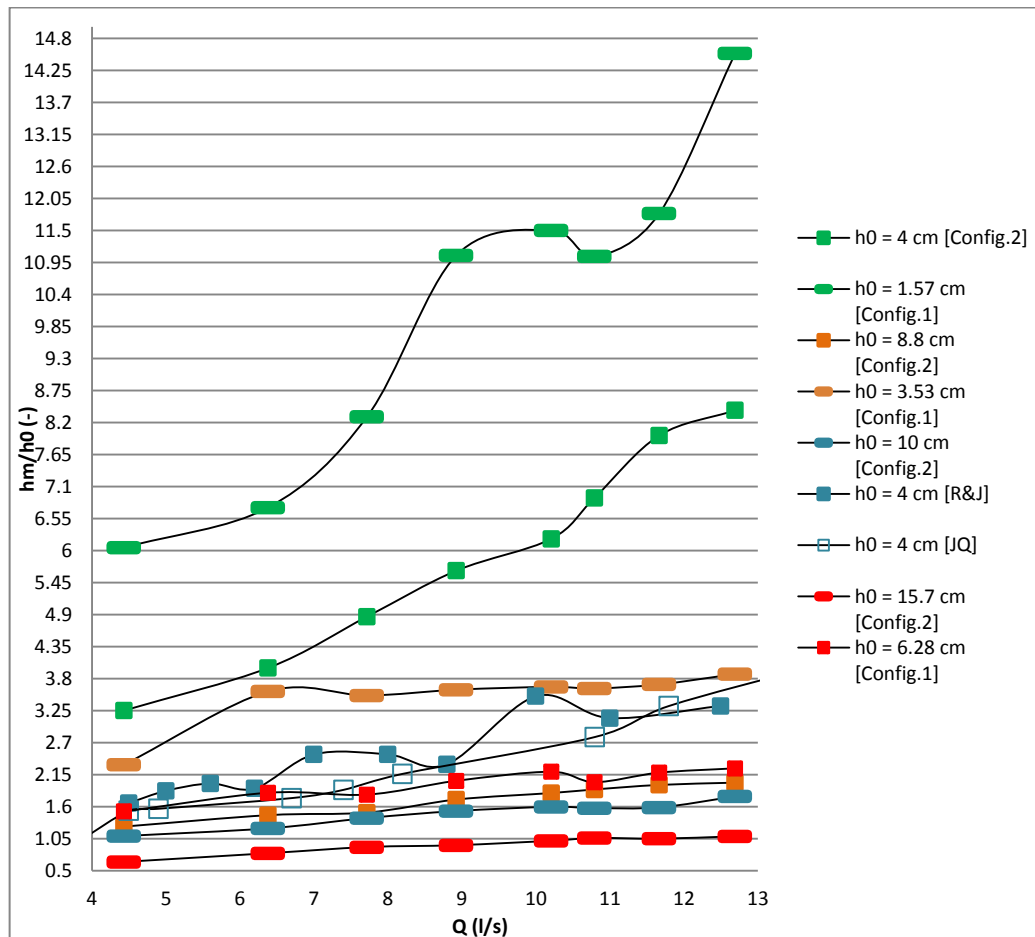


Figura 4.17 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h₀) e o caudal (Q) para aberturas h₀ relativas às mesmas áreas de saída entre a configuração n°1 e a configuração n°2

As aberturas para as 3 configurações para este trabalho foram determinadas com base na relação entre as áreas de saída da configuração nº3 relativamente às configurações nº 1 e nº 2. Na Figura 3.24 está representada a relação entre as aberturas da configuração nº1 (■) e nº 2 (—) para a mesma área de saída na caixa de visita (mesma cor dos marcadores) e verifica-se que não há nenhuma relação aparente no que toca ao nível de água na caixa de visita (adimensional h_m/h_0).

c) **Relação entre as aberturas das configurações nº 1 e nº2 relativas à seção total, a 1/2 seção e a 3/4 da seção da 3ª configuração** – Figura 4.18

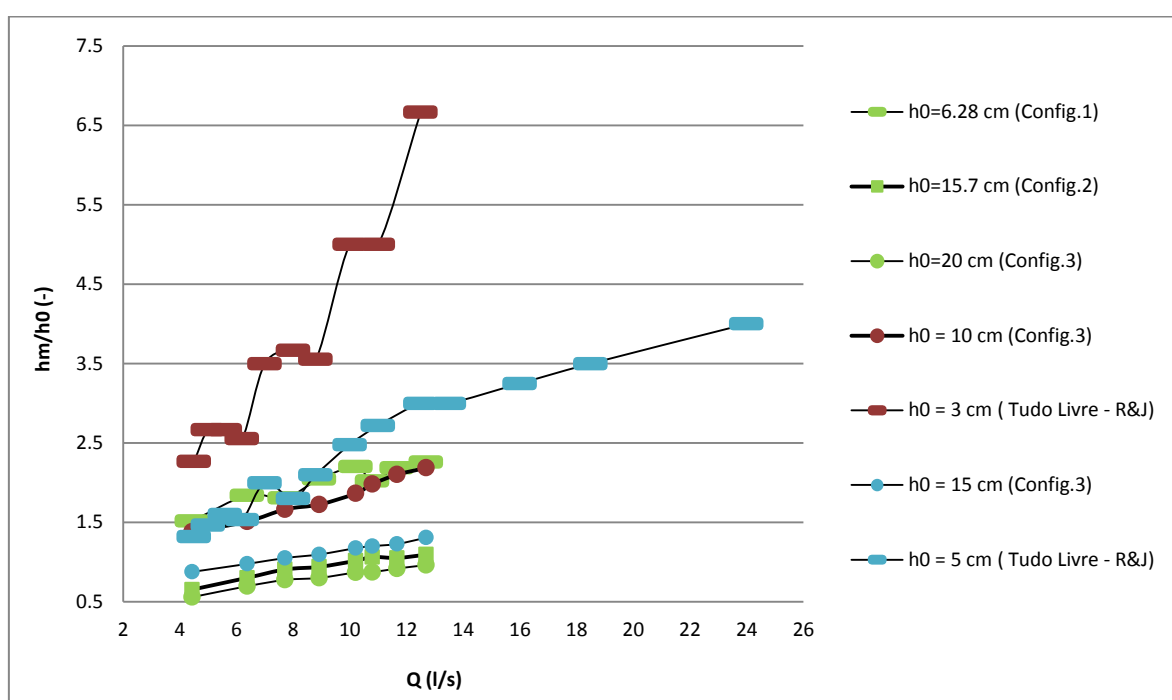


Figura 4.18 – Relação entre o nível de água adimensional na caixa de visita (h_m/h_0) e o caudal (Q) para as aberturas das configurações nº 1 e nº2 relativas à seção total, a 1/2 seção e a 3/4 da seção da 3ª configuração

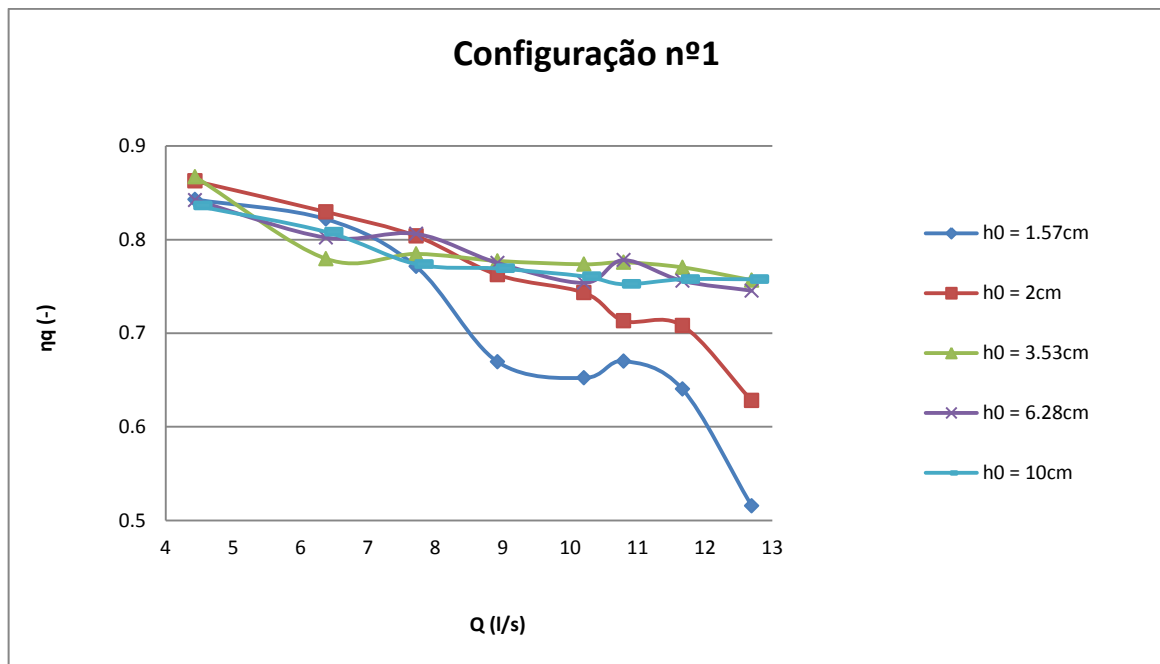
As aberturas (h_0) definidas para a 3ª configuração, ou seja de geometria de saída circular foram de 20 cm (altura total), 15 cm (que corresponde a 3/4 da altura total) e 10 cm (meia altura). A partir destas alturas estabeleceu-se a relação entre as áreas por forma a obter-se as aberturas h_0 para a configuração nº1 e nº2 relativas à seção total, a 3/4 de seção e 1/2 seção da configuração nº3. Isto porque era importante ver se para a mesma área de saída da comporta, com as diferentes aberturas canal e para as diferentes configurações fazia alguma diferença no nível da água na caixa de visita. Como é de notar, não há qualquer relação visível quando se

tem a mesma área (mesma cor) para as diferentes aberturas. Sendo as configurações 2 e 3 mais próximas e sendo a Configuração 1 a que conduz a maiores alturas na caixa de visita.

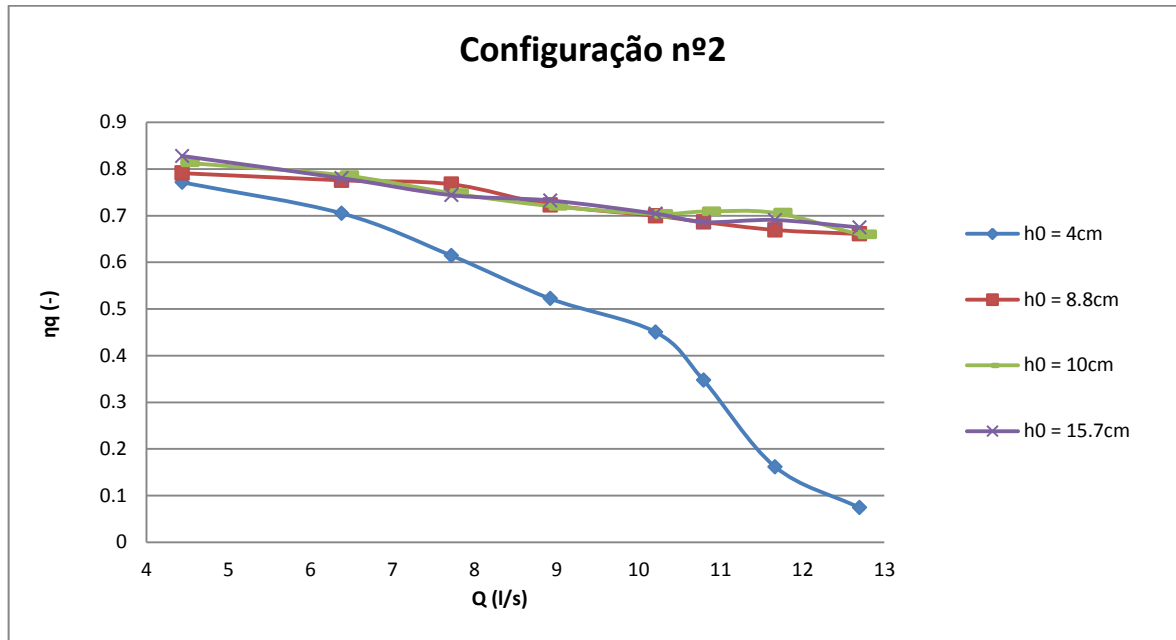
4.2. Análise da Dissipação de Energia

De uma maneira geral, a dissipação de energia tem em consideração a energia total no reservatório que se encontra a montante da caixa de visita, a energia total na caixa de visita e a energia total no fim do ressalto hidráulico. Deste modo, foi possível determinar os três tipos de dissipação de energia e fazer as respectivas comparações entre as três configurações de estudo:

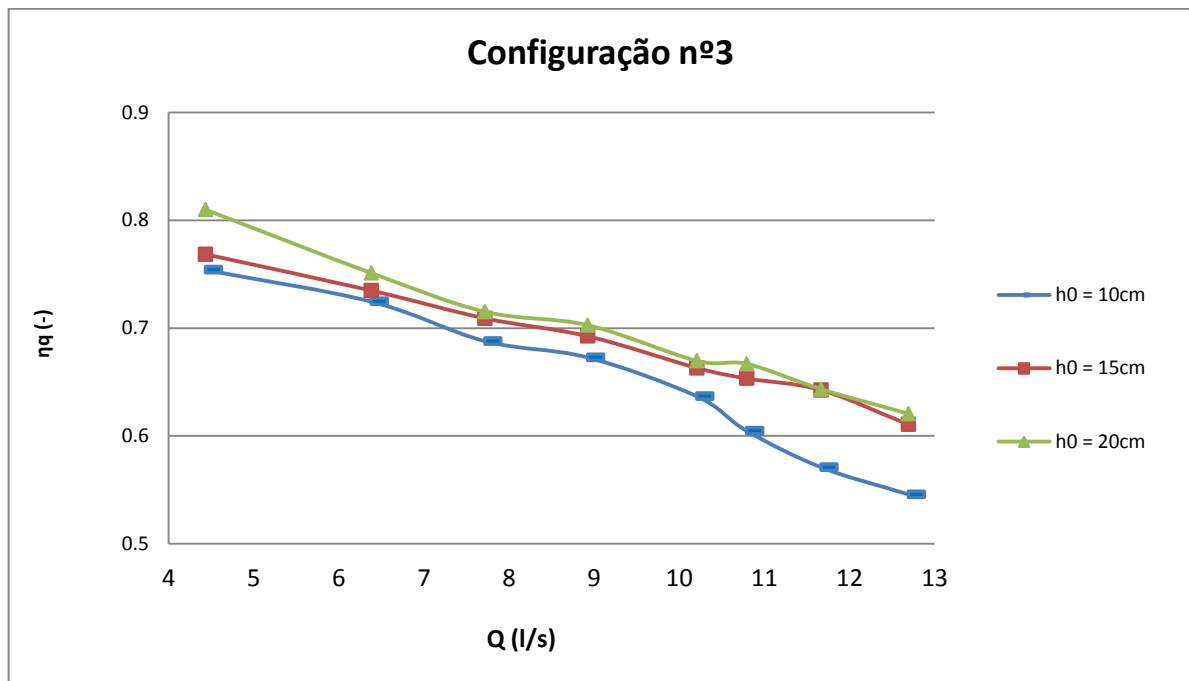
a) **Dissipação de energia devido à queda na caixa de visita (η_q):** - Figura 4.19



a)



b)

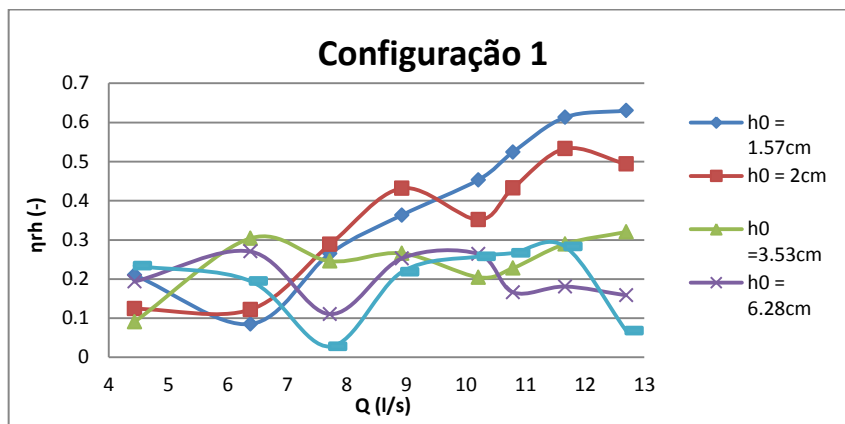


c)

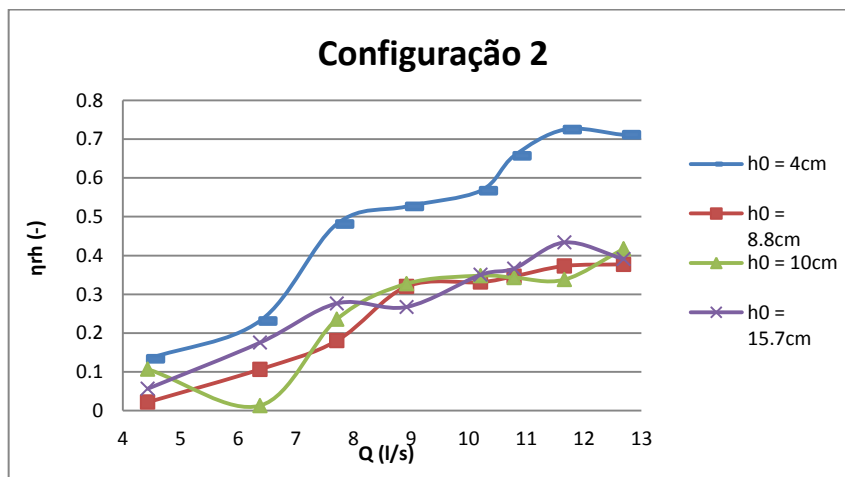
Figura 4.19 – Dissipação de energia devido à queda na caixa de visita (η_q) para as três configurações: a) seção igual a toda a largura do coletor; b) seção quadrada com contração lateral; c) seção de saída de geometria circular

Como se pode constatar pela Figura 4.19, a dissipação de energia devido à queda na caixa de visita segue uma tendência tal que η_q diminui à medida que o caudal aumenta e diminui mais visivelmente para aberturas da comporta decrescentes. Tal facto acontece pelo simples facto de haver um aumento do colchão de água h_m que por sua vez, torna a altura de queda entre o reservatório e o colchão menor amortecendo a queda de água. Fazendo uma análise entre as três configurações verifica-se desde já que a configuração 1 é a que dissipa mais energia por apresentar alturas de queda mais elevadas ou seja, o nível de colchão h_m mais baixo.

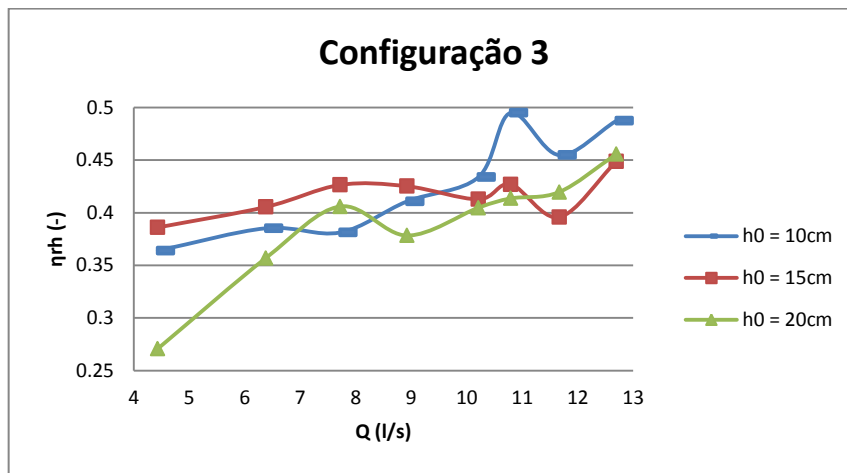
b) Dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico (η_{rh}) – Figura 4.20



a)



b)

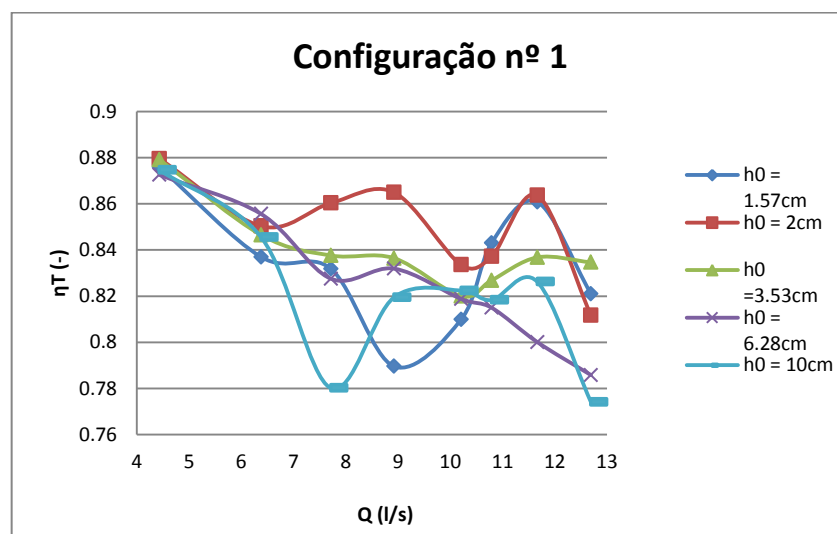


c)

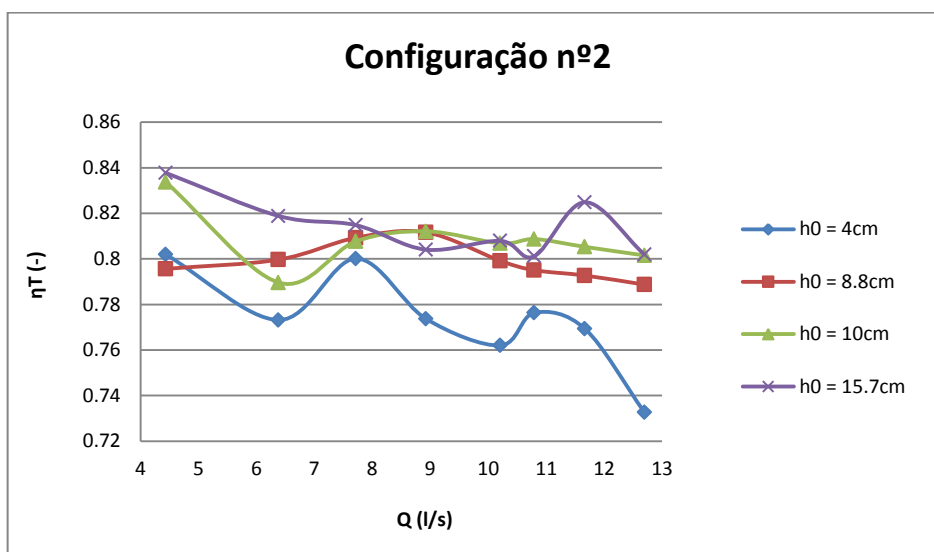
Figura 4.20 - Dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico (η_{rh}) para as três configurações: a) seção igual a toda a largura do coletor; b) seção quadrada com contração lateral; c) seção de saída de geometria circular

De uma maneira geral pode-se constatar pela Figura 4.20 que a dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico aumenta com o aumento do caudal e é mais visível o aumento da dissipação para aberturas de comporta menores relativamente a cada configuração.

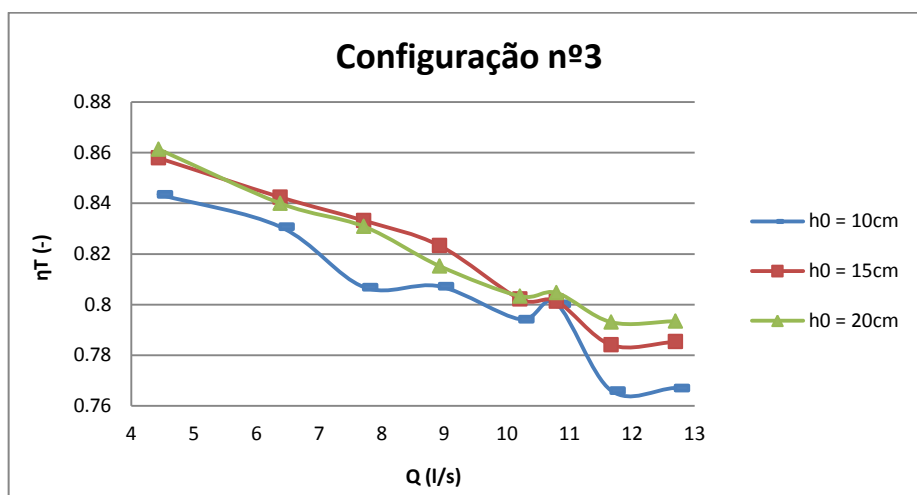
c) **Dissipação de energia total (η_T):** - Figura 4.21



a)



b)

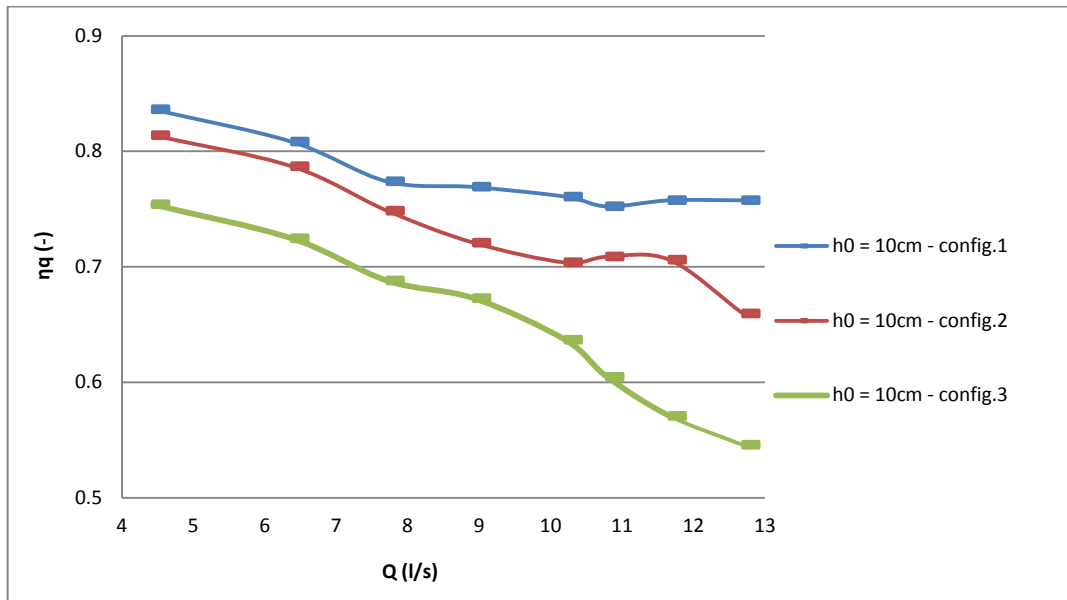


c)

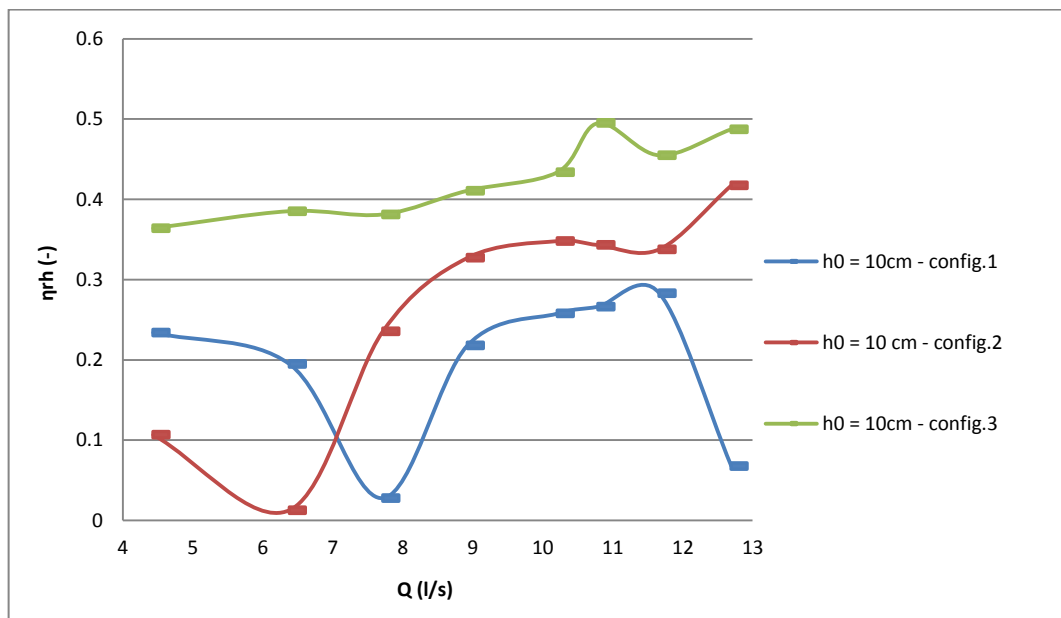
Figura 4.21 - Dissipação de energia total (η_T) para as três configurações: a) seção igual a toda a largura do coletor; b) seção quadrada com contração lateral; c) seção de saída de geometria circular

É constatável pela figura 4.21 que a dissipação total diminui com o aumento do caudal. De uma maneira geral conclui-se que há uma diminuição visível da dissipação de energia total para alturas de comporta menores, nas três configurações apesar de que na configuração 1 há uma grande variação da tendência.

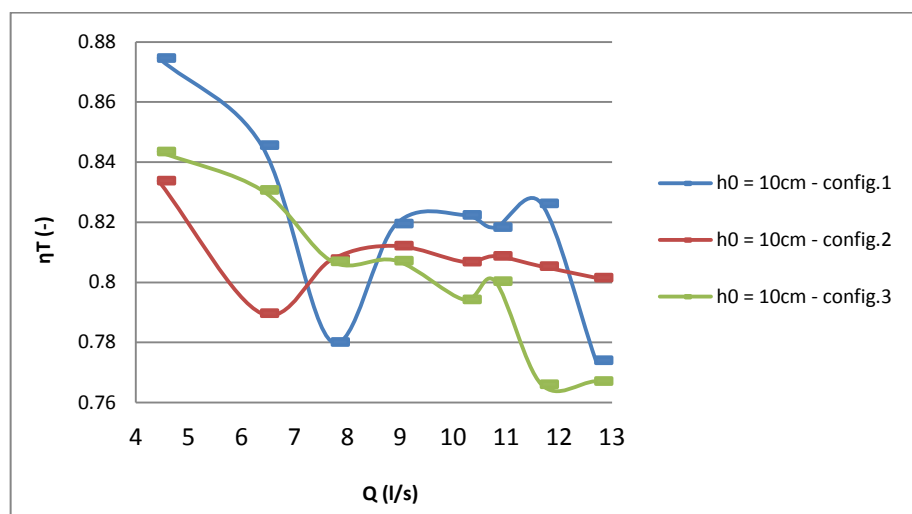
Tendo em conta que a análise efectuada para os três tipos de dissipação de energia acima referidos não permitem concluir qual a configuração mais adequada para dissipar energia, então efectuou-se outra análise tendo por base a altura de comporta h_m comum às três configurações (10 cm) relativamente a cada tipo de dissipação de energia (Figura 4.22).



a)



b)



c)

Figura 4.22 - Dissipação de energia (para os “ $h_0=10cm$ ” comum a todas as configurações), devido: a) à queda na caixa de visita (η_q) ; b) ao ressalto hidráulico a jusante da caixa de visita (η_{rh}); c) total (η_T)

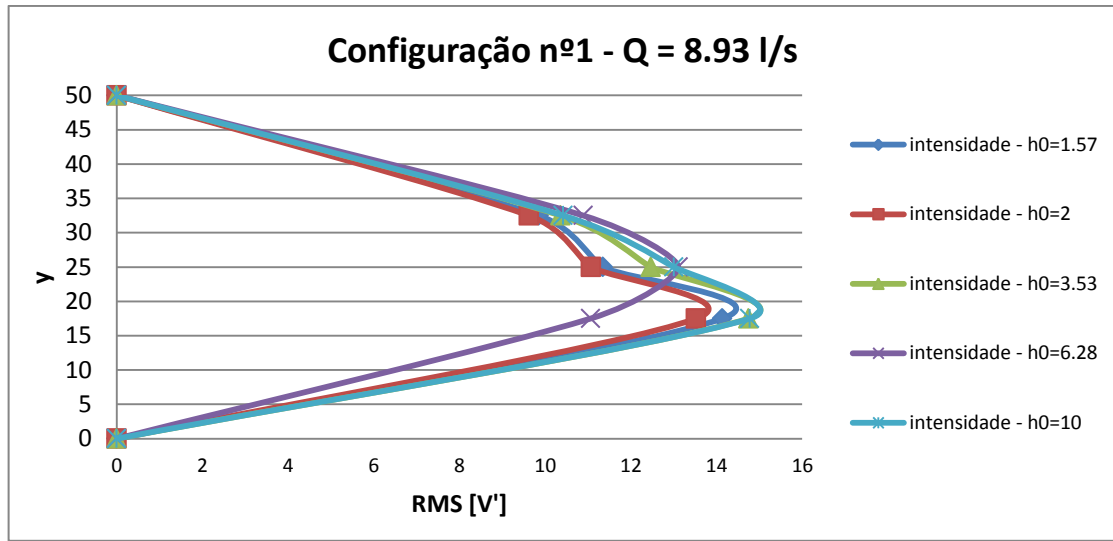
De acordo com a Figura 4.22 a) verifica-se a abertura $h_0=10$ cm relativa à configuração nº 1 dissipa mais energia , enquanto que na Figura 3.29 b) é a configuração nº2. Quanto à Figura 3.29 c) há uma grande variação relativa à dissipação de energia total que pode estar relacionada com a mudança de regime.

4.3. Análise dos resultados obtidos pelo ADV – Intensidade da Turbulência

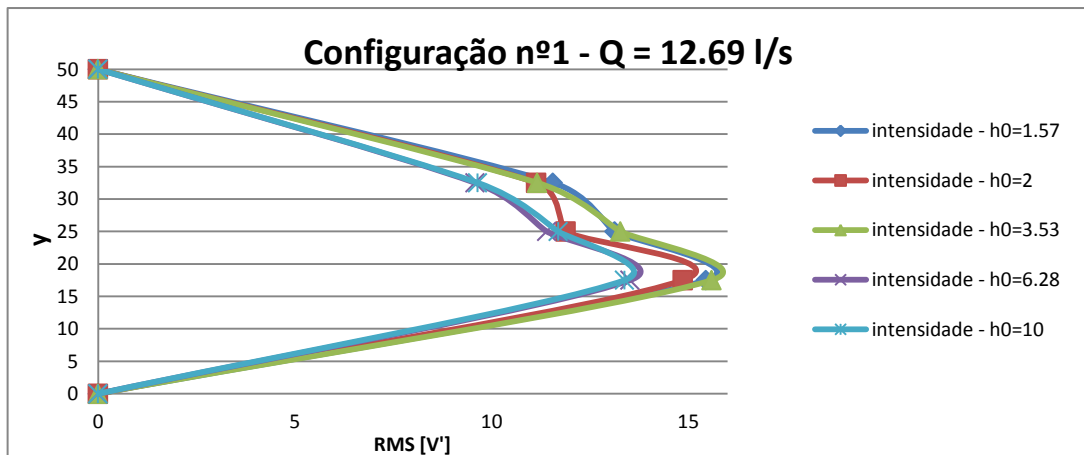
Por forma a verificar-se a bidimensionalidade do escoamento traçou-se os gráficos que relacionam o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência, obtendo-se comportamentos distintos para as 3 configurações de acordo com o tipo de geometria da comporta à saída.

Por forma a verificar se há diferenças no comportamento do escoamento traçou-se os gráficos relativos a cada mudança de caudal que estão disponíveis em anexo. Deste modo apresenta-se aqui os resultados relativos ao caudal 8.93 l/s (caudal mínimo cuja sonda é capaz de detetar sinal) e 12.69 l/s.

4.3.1. Configuração nº 1 – seção igual a toda a largura do coletor – Figura 4.23



a)



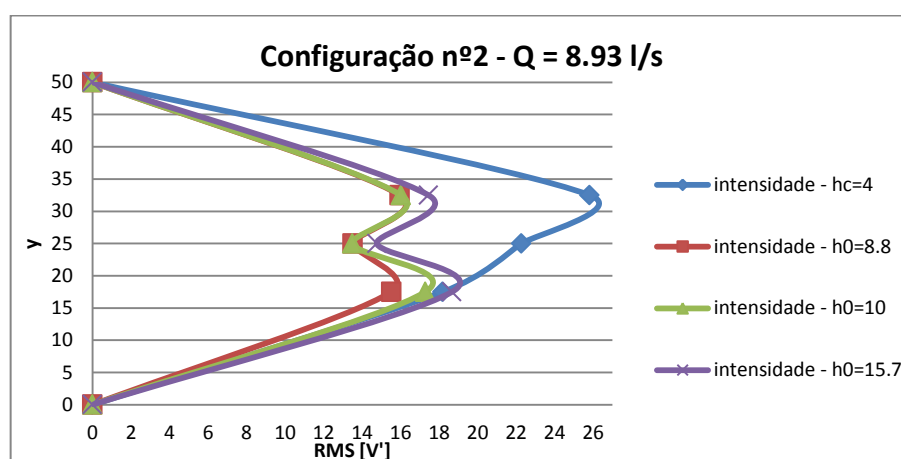
b)

Figura 4.23 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração nº 1 para: a) Q=8.93 l/s; b) Q=12.69 l/s

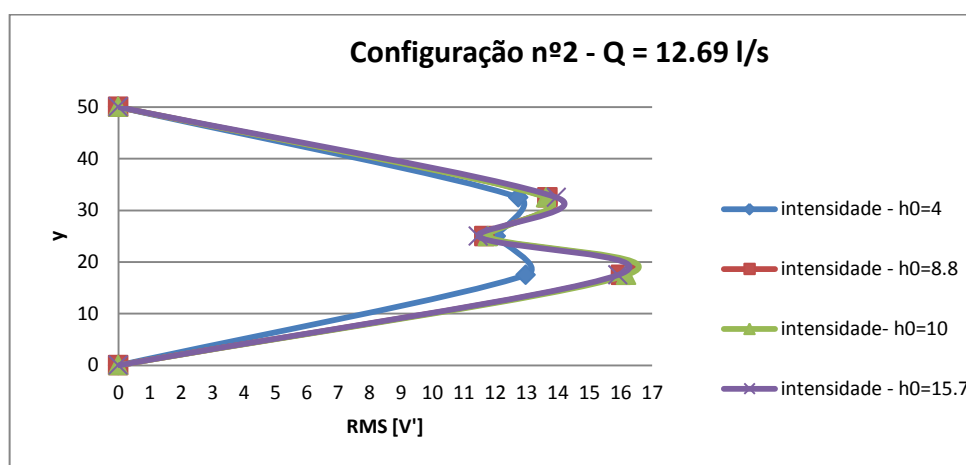
É de notar pela Figura 4.23 que todas as aberturas h_0 seguem a mesma tendência apesar de que para o caudal mais baixo (7.71 l/s) e para a abertura maior $h_0=10\text{cm}$ há mais intensidade de turbulência enquanto que para o caudal maior (12.69 l/s) já se verifica precisamente o oposto, ou seja, a intensidade da turbulência para $h_0=10\text{cm}$ já é mais baixa e em ambos os

gráficos a intensidade máxima acontece no alinhamento central da seção de saída. Está-se perante um “mixing layer” (Quadro 3.2) de acordo com (David Apsley, 2013).

4.3.2. Configuração nº 2 – seção quadrada com contração lateral – Figura 4.24



a)



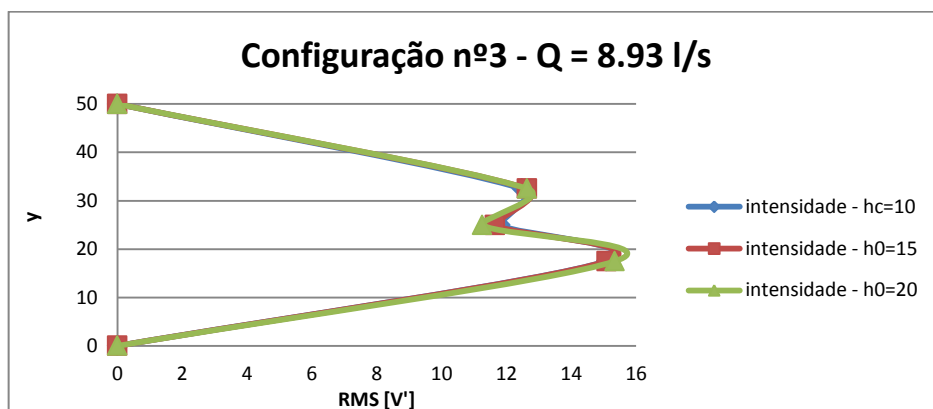
b)

Figura 4.24 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS[V']) relativa a configuração nº 2 para: a) Q=8.93 l/s; b) Q=12.69 l/s

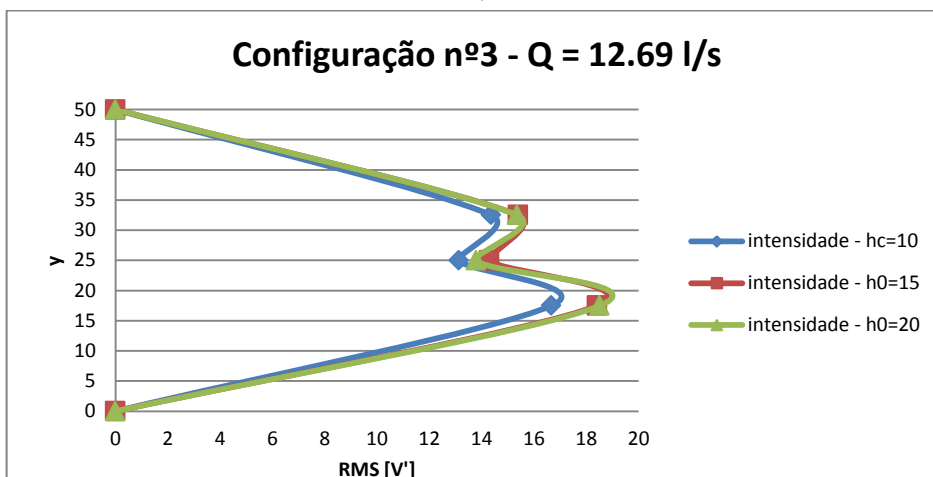
Segundo David Apsley (2013) está-se perante um caso de “jet (plane or axisymmetric)”. Para o caudal mais baixo e para a abertura menor tem-se intensidades de turbulência maiores. Para o caudal maior, tal já não acontece apesar de haver uma simetria da intensidade ao nível

do alinhamento média da seção de saída (contraída) para as aberturas maiores: $h_0=8.8\text{cm}$, $h_0=10\text{cm}$ e $h_0=15.7\text{cm}$ para os dois caudais representados. Os pontos máximos (simétricos) das curvas correspondem ao limite exterior da contração da comporta.

4.3.3. Configuração nº 3 – seção de saída de geometria circular – Figura 4.25



a)



b)

Figura 4.25 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração nº 3 para: a) $Q=8.93\text{ l/s}$; b) $Q=12.69\text{ l/s}$

Relativamente ao caudal mais baixo a intensidade da turbulência para todas as configurações tem praticamente o mesmo comportamento. Para o caudal mais elevado, e para a abertura de 10cm há uma redução da translação relativamente às outras aberturas. É importante referir

que o valor mínimo da intensidade de turbulência para todas as aberturas corresponde ao centro do orifício circular por onde sai água em todo o escoamento.

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusões

Neste trabalho elaborou-se um estudo do escoamento num modelo físico de grande escala no laboratório, onde se simularam diversos escoamentos a passar numa caixa de visita com queda e coletor a jusante, cuja transição caixa de visita-coletor era controlada por uma comporta a com diferentes aberturas e geometrias. A seção da comporta coincide com a seção transversal do canal e o seu movimento é controlado através de um comando instalado no canal. Consideraram-se três geometrias distintas: seção igual a toda a largura do coletor seção quadrada com contração lateral e seção de saída de geometria circular. A metodologia baseou-se na análise detalhada de grupos de 10 fotografias para cada regime, para cada abertura da comporta e em dois locais, na Caixa de Visita e a jusante desta. As fotografias foram tiradas todas dos mesmos dois pontos fixos (caixa de visita e a jusante desta) e sobrepostas com régua graduada utilizando o software Autocad. Fez-se uma seleção das cinco fotografias mais representativas relativas a cada configuração. Efetuaram-se igualmente medições de velocidade com o ADV a jusante, onde o arejamento não era tão relevante e que permitiu medições fidedignas.

Fez-se variar os caudais numa gama de 4.43 l/s até 12.69 l/s e as aberturas da comporta variaram de forma diferente conforme a configuração e a sua determinação teve por base a relação entre as áreas a partir das aberturas da configuração nº3 (seção de geometria circular) cujas aberturas eram concretas: 20 cm para altura total livre, 10cm para meia altura livre e 15 cm para $\frac{3}{4}$ de altura total livre.

Constatou-se em todos os ensaios que tanto a geometria como a contração da comporta a jusante da caixa de visita, influenciam o escoamento, com a mudança de caudal e com a influência da mudança da abertura da comporta. Os resultados obtido para os coeficientes de vazão, para a dissipação de energia e para a intensidade da turbulência (através do uso do ADV) comprovam esta verificação.

Genericamente, a análise dos coeficientes de vazão relativas às três configurações permitiu concluir que:

- Há um aumento do coeficiente de vazão à medida que se aumenta o caudal e para aberturas de comportas inferiores, mas este aumento não é constante;
- Há situações em que se verificou a transição de uma situação de descarregador para uma situação de orifício que é comprovada pelo aumento repentino do coeficiente de

vazão. Nestes casos, aplicou-se a fórmula de orifício e fez-se traçar a curva representativa por forma a estabelecer as diferenças.

- Para as diferentes aberturas da comporta ao fundo do canal e para cada configuração, fez-se uma aproximação a fim de se definir o melhor ajuste relativamente aos coeficientes de vazão e os melhores resultados (maior coeficiente de correlação) foram obtidos na 3ª configuração. Neste caso, o valor mais baixo da aproximação corresponde à transição de descarregador para orifício, mas mesmo assim foi um bom resultado.

Neste trabalho, achou-se pertinente estabelecer comparações entre as alturas comuns relativamente ao meu trabalho e aos trabalhos anteriormente desenvolvidos, sobre esta matéria, pelos Orientadores, e pela Mestre Joana Querido e constatou-se que para a mesma altura, os valores são coerentes entre si. Fez-se também a comparação entre as aberturas relativas à mesma área de saída na comporta para as três configurações e foi de notar que não há qualquer relação visível quando se tem a mesma área para as diferentes aberturas.

A dissipação de energia foi avaliada em termos de:

- dissipação devido à queda na caixa de visita (η_q);
- dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico (η_{rh});
- dissipação de energia total (η_T);

De uma maneira geral, foi possível concluir que:

- a dissipação de energia devido à queda na caixa de visita tende a diminuir à medida que se aumenta os caudais e para aberturas de comporta menores;
- a dissipação de energia devido ao ressalto hidráulico aumenta com o aumento do caudal ;
- a dissipação de energia total diminui com o aumento do caudal.

Quanto à intensidade da turbulência, através de dados obtidos pelo ADV, fizeram-se as comparações relativamente às 3 configurações para toda a gama de caudais em estudo e verificou-se que a geometria de saída da comporta influencia nos valores de intensidade. Na configuração nº 2 é visível uma simetria nos valores de intensidade de turbulência em toda a largura do canal e os picos máximos de intensidade correspondem ao limite exterior da contração da comporta. Já na configuração nº 3 foi possível reparar que a intensidade mínima ocorre no alinhamento médio da seção de saída de geometria circular.

5.2. Sugestões para o prosseguimento do estudo

Seria interessante fazer-se uma avaliação do coeficiente de vazão e da dissipação de energia quando se tem caixas de visita circulares, para tal poder-se-ia usar a instalação experimental do Dual Drainage no LHRA do DEC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo Netto, J. M., e Alvarez, G. (1982). *Manual de hidráulica. rev. e compl.*

Bagheri, S., Afzalimehr, H., e Sui, J. (2010). "Briefing: Discharge coefficient for sluice gates." *Water management*, 163(9), 435-438.

Carvalho, R. F. (2009). "Apontamentos de drenagem pública ".

Carvalho, R. F., e Leandro, J. (2010). "Physical investigation of the flow in a squared manhole drop and downstream ".

Carvalho, R. F., e Leandro, J. (2012). "Hydraulic characteristics of a drop square manhole with a downstream control gate".

Chanson, H. (2004). "Hydraulics of rectangular dropshafts." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130, 523.

Christodoulou, G. C. (1991). "Drop manholes in supercritical pipelines." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 117(1), 37-47.

David, A. (2013), *Computational Hydraulics: Introduction to turbulence*. SPRING

David, L.M., Carvalho, R.F. (2010). /Estudo das bacias de retenção do sistema de drenagem da Penalva/. Estudo elaborado para a Câmara Municipal do Barreiro. Relatório 131/2010 - NES, LNEC, Lisboa, Abril de 2010 (confidencial).

Folwell, H. P. (1901). *Sewerage: the designing, construction, and maintenance of sewerage systems*, John Wiley.

Goring, D. G.; Nikora, V. I. (2002). "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 1, 117-126.

Granata, F., de Marinis, G., Gargano, R., e Hager, W. (2011). "Hydraulics of circular drop manholes." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 137, 102.

Granata, F., de Marinis, G., Gargano, R., Hager, W.H. (2009), Energy loss in circular drop manholes. 33rd IAHR

<http://www.bsr.ac.uk/>

<http://www.em.ufop.br/>

MARSALEK, J., (2005). "Evolution of urban drainage from cloaca maxima to enviromental sustainability". ACQUA E CITTÀ. ICONVEGNO NAZIONALE DI IDRAULICA URBANA Sant' Agnello (NA), 28-30

Lencastre, A. (1972). "Manual de hidráulica geral."

Manzanares, A. A. (1979). "Hidráulica Geral. I-Fundamentos Teóricos." Técnica, AEIST, Lisboa

Marinis, G., Rudy, G., Francesco, G., e Hager, W. (2007). "Circular drop manholes: Preliminary experimental results."

Martins, R., Leandro, J., e Carvalho, R. (2010). "Discharge capacity of circular orifices arranged at a flume bottom." *3rd International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures*.

Matos, J. (2003). "Aspectos Históricos a Actuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano." *Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Lisboa*, 13-21.

Pinheiro, A., (2006). "Estruturas Hidráulicas: Obras de Dissipação de Energia." *Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico*

Querido, J. (DEC, 2010/2011). "Coeficientes de vazão nas caixas de visita com geometrias variadas". FCTUC).

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

Rajaratnam, N., Zhu, D. e Carmino, G. (2009). "Hydraulic study of stacked drop manholes".

RGSPDADAR. (1995). "Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais." Decreto-Lei 23/95 de 23 de Agosto de 1995, Lisboa.

Sá Marques, J. A. A., e Sousa, J. J. O. (2011). "Hidráulica Urbana: Sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais." *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 16(1), iv-iv.

Sanagiotto, D., Pinheiro, A., Marques, L., (2011). "Estudo Experimental das Características do Escoamento em Escadas para Peixes do Tipo Ranhura Vertical — Turbulência do Escoamento." RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 16 n.4 - Out/Dez 2011, 195-205.

Santos, F., Carvalho, R., e Sancho, F. (2008). "Performance of a Multipurpose Hydraulic Channel."

SONTEK. (2001). Sontek ADVField Acoustic Doppler Velocimeter. Technical Documentation. San Diego, USA.

SONTEK. (2008). MicroADV Expanded Description. San Diego, USA.

Sousa, E. A., e Monteiro, A. J. (1990). *Órgãos Gerais de Sistemas de Drenagem*, Lisboa.

Stacey, E., Blachford, L., e Cengage, G. (2002). ""Manhole Cover." How Products are Made." eNotes.com.

Steel, E. W., e McGhee, T. J. (1960). "Water supply and sewerage." *McGraw-Hill Book Company. New York, 5 th edition,(05: 06: 07 A STE), 1979, 679.*

Swamee, P. K. (1992). "Sluice Gate Discharge Equations." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 118, 56.

WAHL, T. L. (2000). "Analyzing ADV Data Using WinADV." 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management

WAHL, T. L. (2003). Discussion of "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data" by D. G. Goring & V. I. Nikora. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 6, 484-487.

ANEXO A

Gráfico A.1 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração nº 1 – Q=10.21 l/s

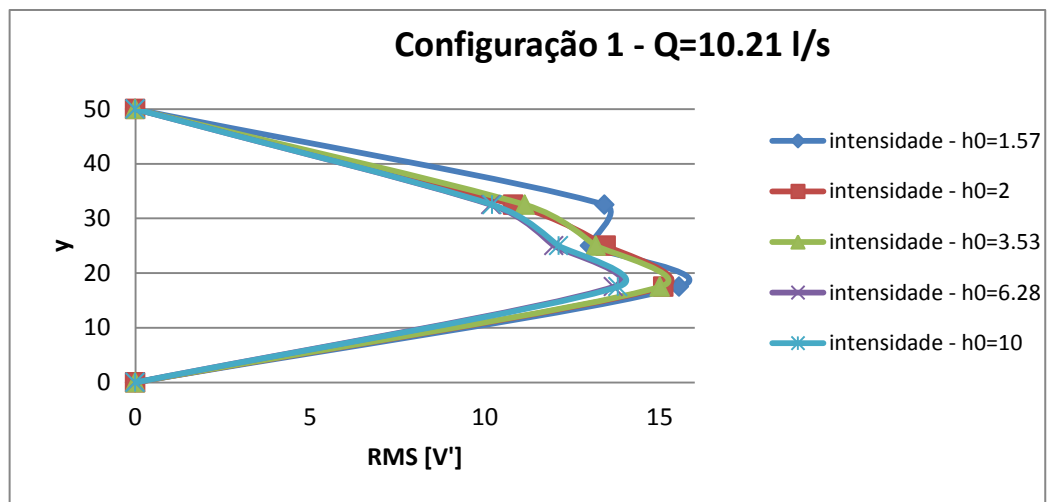


Gráfico A.2 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração nº 1 – Q=10.79 l/s

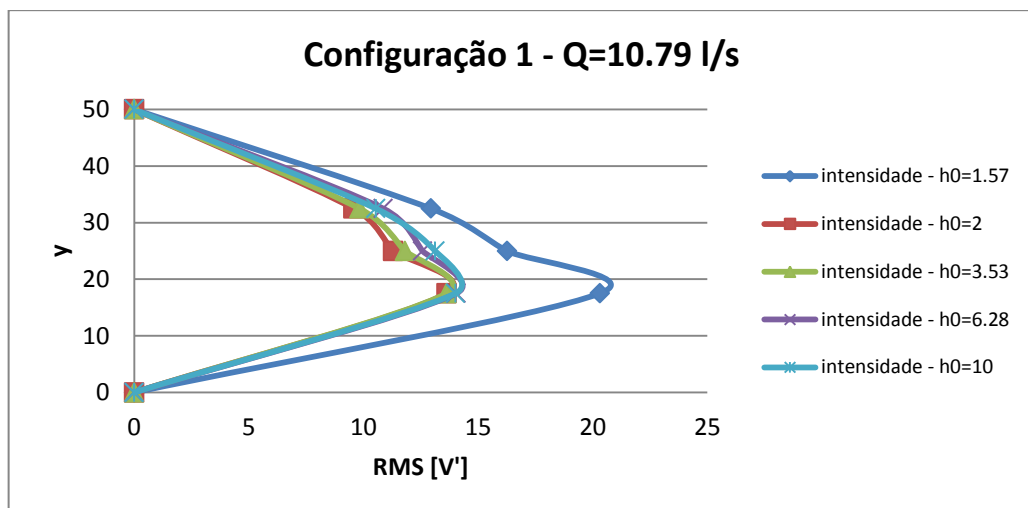


Gráfico A.3 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração nº 1 – Q=11.67 l/s

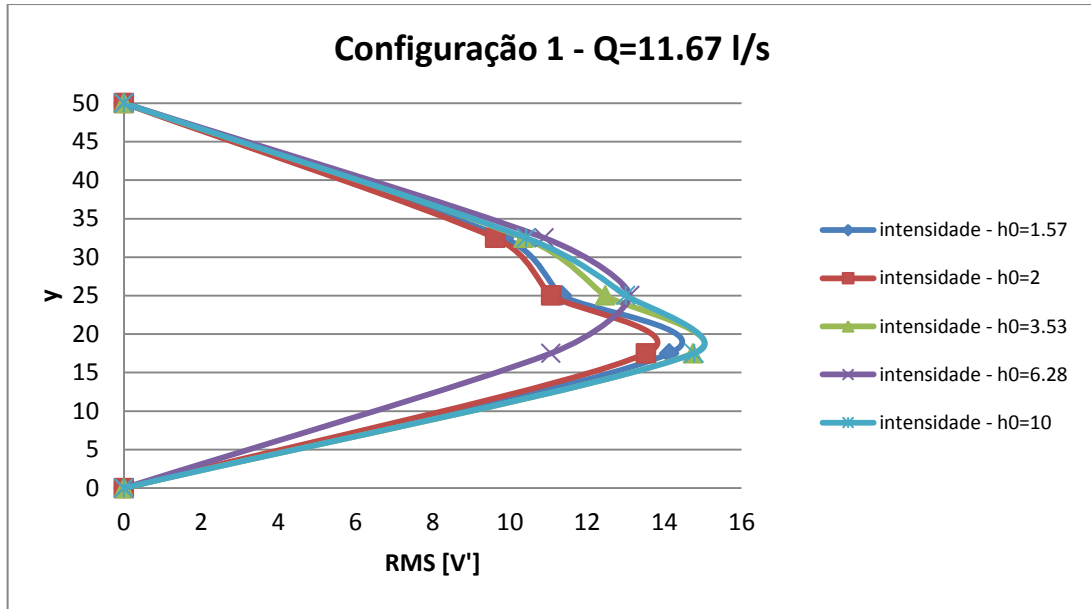


Gráfico A.4 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração nº 2 – Q= 10.21 l/s

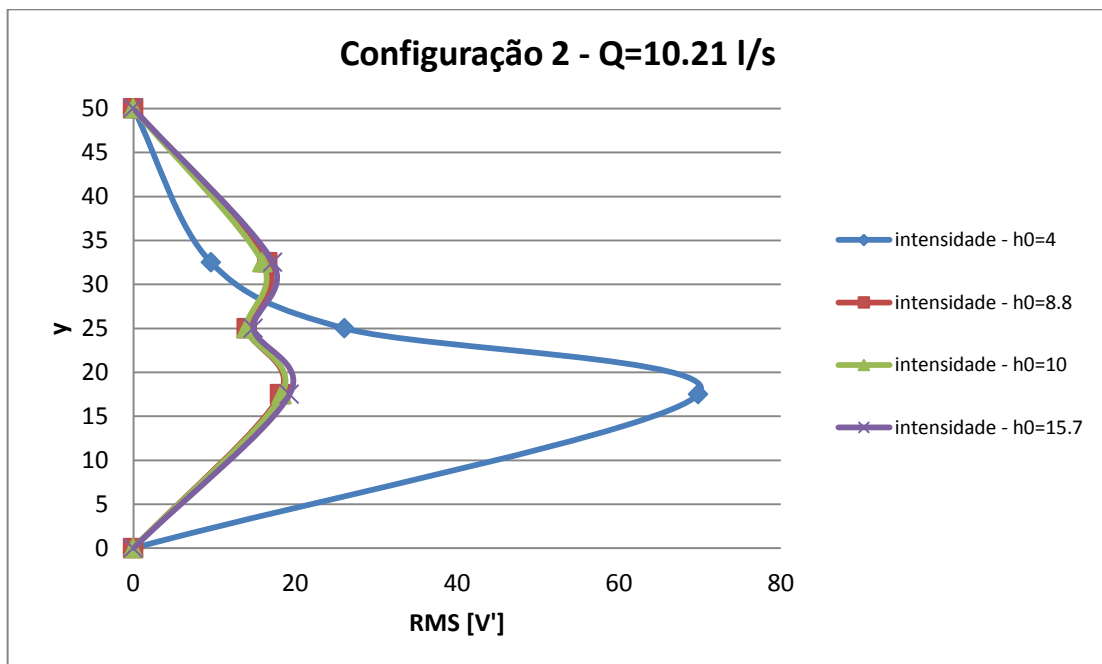


Gráfico A.5 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração n° 2 – Q= 10.79 l/s

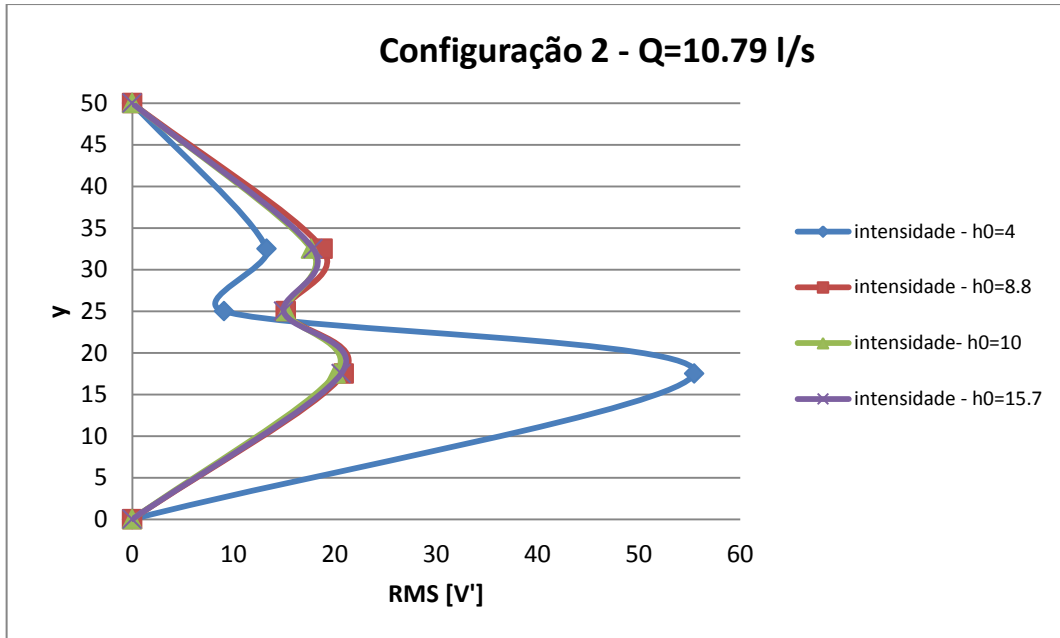


Gráfico A.6 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração n° 2 – Q= 11.67 l/s

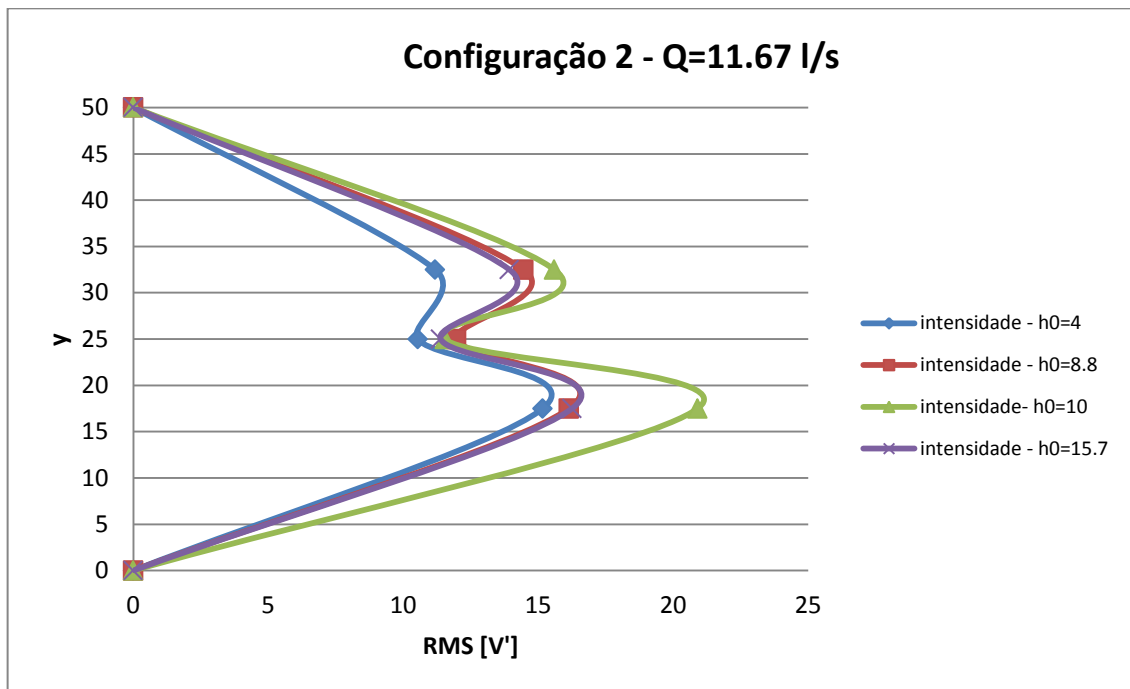


Gráfico A.7 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V']) relativa a configuração n° 2 – Q= 10.21 l/s

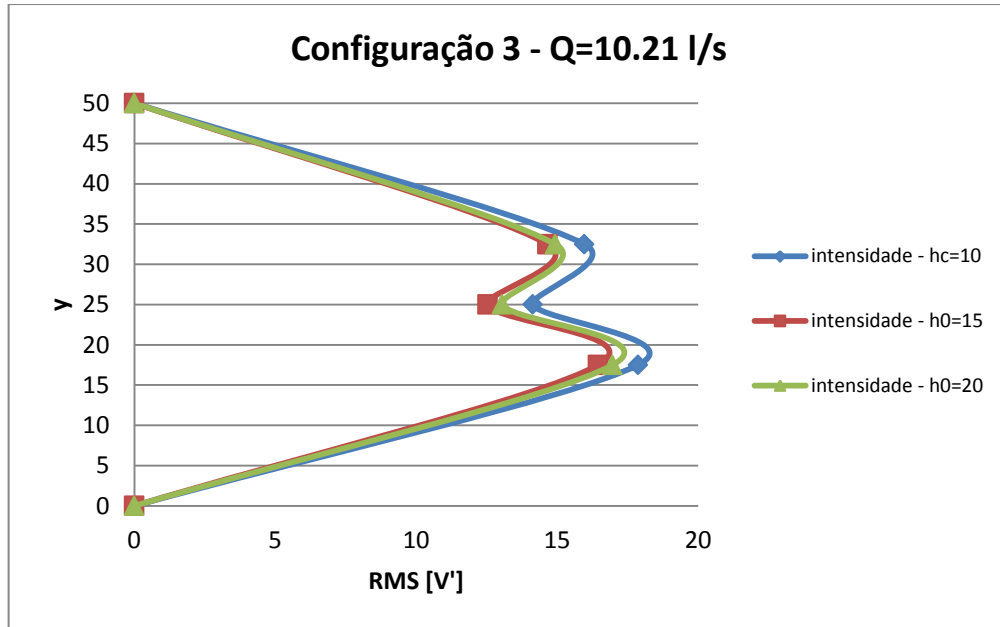


Gráfico A.8 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS[V']) relativa a configuração n° 2 – Q= 10.79 l/s

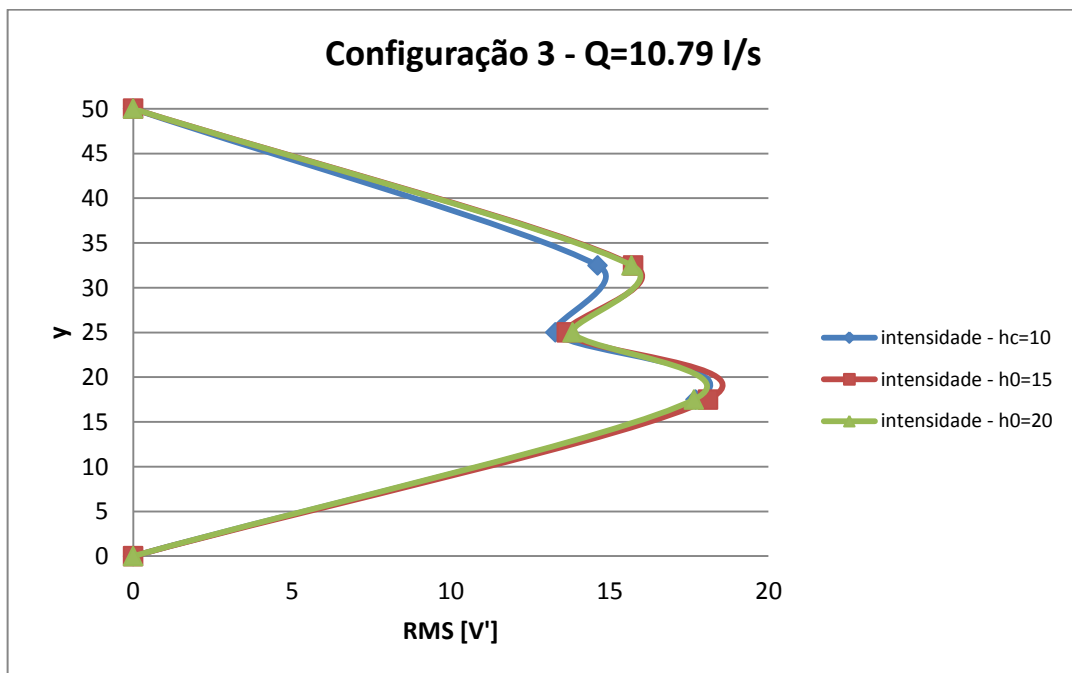


Gráfico A.9 – Relação entre o sentido do escoamento com a intensidade da turbulência (RMS [V^2]) relativa a configuração nº 2 – $Q= 11.67$ l/s

