

UNIVERSIDADE FEDERALDE SÃO JOÃO DEL-REI

ALBERTO VAROTTO RINCO DUTRA

HERIVELTO DA SILVA TEIXEIRA

JÚLIA FERNANDES ARTUR

MARIANA OLIVEIRA TEIXEIRA

DESENVOLVIMENTO DE AULAS PRÁTICAS PARA AS
DISCIPLINAS MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA DO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO *CAMPUS* ALTO
PARAOPEBA

Ouro Branco

Dezembro de 2016

Alberto Varotto Rinco Dutra
Herivelto da Silva Teixeira
Júlia Fernandes Artur
Mariana Oliveira Teixeira

DESENVOLVIMENTO DE NOVAS AULAS PRÁTICAS PARA AS
DISCIPLINAS MECÂNICA DOS FLUIDOS E HIDRÁULICA DO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO *CAMPUS* ALTO
PARAOPEBA

Trabalho de contextualização e integração curricular II apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel de Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profº Emmanuel
Kennedy da Costa Teixeira

Ouro Branco
Dezembro de 2016

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
2	OBJETIVO.....	6
2.1	Objetivos específicos.....	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1	Definição de conduto forçado, linha de energia e piezométrica e perda de carga.....	7
3.1.1	Fórmula de Flamant.....	8
3.1.2	Tomada intermediária entre dois reservatórios.....	9
3.2	Orifícios.....	12
3.2.1	Classificação dos orifícios.....	12
3.2.2	Vazão descarregada por um orifício.....	13
3.2.3	Orifícios afogados de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa.....	14
3.2.4	Orifícios livres, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa.....	16
3.2.5	Orifícios livres, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração incompleta.....	16
3.2.6	Bocais.....	17
3.2.7	Classificação de bocal.....	17
3.2.8	Cálculo de vazão descarregada por bocal.....	18
3.2.9	Determinação da velocidade real do jato d'água utilizando coordenadas cartesianas.....	19
3.2.10	Escoamento sob carga variável.....	21
4	METODOLOGIA.....	23
4.1	Elaboração de roteiro para o aparato já existente.....	23
4.1.1	Determinação do coeficiente de Flamant.....	23
4.1.2	Tomada intermediária entre dois reservatórios.....	24
4.2	Elaboração e construção de um novo aparato.....	24
4.2.1	Determinação do coeficiente de descarga de um bocal e de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa.....	25
4.2.2	Determinação do tempo de esvaziamento do reservatório.....	26
4.2.3	Determinação da velocidade real do jato e do coeficiente de velocidade de um orifício livre, de parede delgada e com contração completa utilizando coordenadas cartesianas.....	26

4.2.4	Determinação do coeficiente de descarga para um orifício retangular, com descarga livre, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração incompleta	26
4.2.5	Determinação do coeficiente de descarga para orifício circular, afogado, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1	Elaboração de roteiro para o aparato já existente.....	28
5.1.1	Determinação do coeficiente de Flamant do tubo em acrílico	28
5.1.2	Tomada intermediária entre dois reservatórios	28
5.2	Construção de um novo aparato e elaboração de novas práticas	29
5.2.1	Determinação do coeficiente de descarga de um bocal e de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa	30
5.2.2	Determinação do tempo de esvaziamento do reservatório.....	31
5.2.3	Determinação da velocidade real do jato e do coeficiente de velocidade de um orifício livre, pequeno, de parede delgada e com contração completa utilizando coordenadas cartesianas.....	31
5.2.4	Determinação do coeficiente de descarga para um orifício retangular, descarga livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração incompleta	32
5.2.5	Determinação do coeficiente de descarga para orifício circular, afogado, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa	32
6	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	35
	APÊNDICE A.....	36
	APÊNDICE B.....	43

1 INTRODUÇÃO

O ensino tradicional considera o conhecimento como um conjunto de informações transmitidas pelos professores aos alunos. Este método envolve o desenvolvimento de formas de pensar, de estruturas mentais e para isso, não basta que o professor transmita ao estudante apenas uma grande quantidade de informações, mas também uma visão prática do assunto abordado.

O professor é quem determina a metodologia, conteúdo, avaliação e forma de interação na aula. Com o passar do tempo, percebeu-se a necessidade de assimilar o conhecimento através de uma ligação entre a teoria e prática.

As práticas podem construir uma nova visão sobre um tema já abordado em sala de aula, gerando discussões a respeito de fenômenos que acontecem à sua volta durante as aulas e fazendo com que os alunos, além de exporem suas idéias, aprendam a respeitar as opiniões de seus colegas. Os pontos fundamentais do processo de ensino serão o desenvolvimento do aluno e o produto da aprendizagem.

O curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del Rei no *Campus* Alto Paraopeba possui uma grade curricular que prevê nove aulas práticas na disciplina de Mecânica dos Fluidos e nove em Hidráulica, no entanto, essa demanda ainda não é cumprida. Percebendo-se a importância destas aulas práticas no aprendizado e a carência delas no curso, desenvolveu-se um aparato e novas aulas práticas que pudessem suprir tais necessidades.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de aulas práticas relacionadas às disciplinas de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del Rei, Campus Alto Paraopeba.

2.1 Objetivos específicos

O desenvolvimento deste trabalho objetivou:

- Elaborar um roteiro didático para a aula prática que visa determinar as vazões de escoamento quando se tem uma tomada de água entre dois reservatórios; e o coeficiente de Flamant para tubulação em acrílico.
- Determinação do coeficiente de descarga de um bocal e de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa;
- Determinação do tempo de esvaziamento de reservatório;
- Determinação da velocidade real do jato e do coeficiente de velocidade de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa;
- Determinação do coeficiente de descarga corrigido para orifício retangular com contração incompleta;
- Determinação do coeficiente de descarga para orifício circular afogado, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição de conduto forçado, linha de energia e piezométrica e perda de carga

Denomina-se conduto forçado aquele em que o fluido circundante preenche integralmente a seção da tubulação, cuja pressão interna é diferente da atmosférica e no qual não há contato com o meio externo.

O sentido de escoamento em condutos forçados pode dar-se em qualquer direção ao longo da tubulação. Para conhecimento de suas características hidráulica, pode-se recorrer à Equação da Energia (Equação 1).

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_{12}}{\gamma} + Z_{12} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (1)$$

Em que

$\frac{p_i}{\gamma}$ é a carga de pressão;

Z_i é a carga de elevação;

$\frac{V_i^2}{2g}$ é a carga cinética;

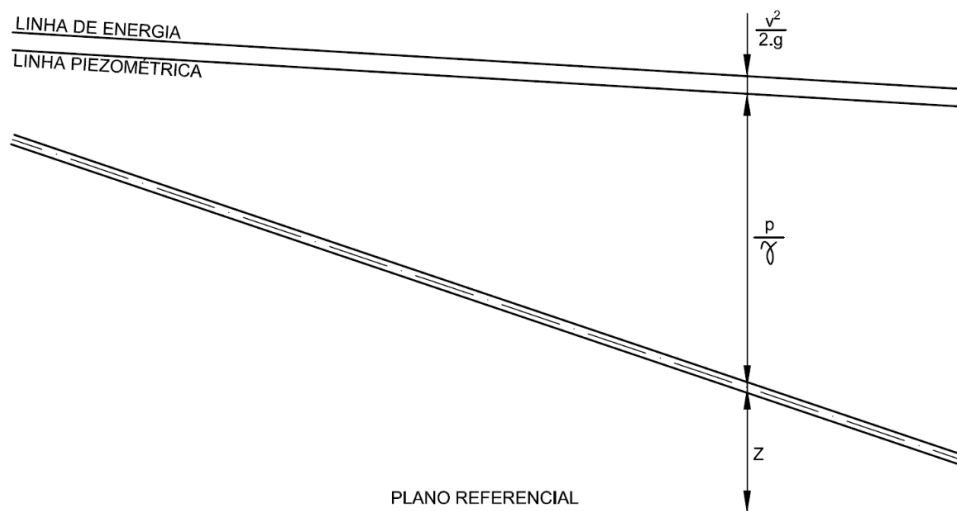
ΔH_{ij} é a perda de carga total, dada pela soma das perdas de carga contínua e acidental.

A linha imaginária que representa a energia de escoamento do fluido, com relação a um dado referencial é chamada linha de energia ou linha de carga. É obtida através da soma das três parcelas de carga da Equação 1. O resultado dessa soma é denominado cota energética.

A linha piezométrica é a linha representativa das cotas piezométricas, que são dadas pela soma das cargas de pressão e elevação. Para traçá-la, utiliza-se piezômetros, os quais são manômetros de colunas líquidas, sendo a carga de pressão dada pelo valor da coluna líquida acima da tubulação.

Tem-se que as duas linhas são defasadas no valor da carga cinética. Na Figura 1 estão representadas as linhas de energia e piezométrica para um trecho de tubulação.

Figura 1 - Representação das linhas de energia e piezométrica para uma tubulação



Fonte: SANTOS e MAIA, 2015.

Para a Equação 1, podem ser feitas as seguintes considerações:

- A carga cinética é constante para um trecho de tubulação de diâmetro constante, no qual o escoamento é permanente e uniforme;
- A diferença entre as duas cotas geométricas pode ser obtida sabendo-se o ângulo entre o trecho de tubulação e o plano de carga efetivo;
- Medindo-se a altura de coluna d'água (h) no piezômetro, obtém-se a carga de pressão na seção onde o piezômetro está instalado.

3.1.1 Fórmula de Flamant

Para o cálculo da perda de carga contínua (h_f) em tubulações de diâmetros pequenos, compreendidos entre 12,5 e 100,0 mm, é usada a Equação de Flamant (Equação 2).

$$h_f = 6,1b \frac{L}{D^{4,75}} Q^{1,75} \quad (2)$$

Em que

b representa o coeficiente de Flamant;

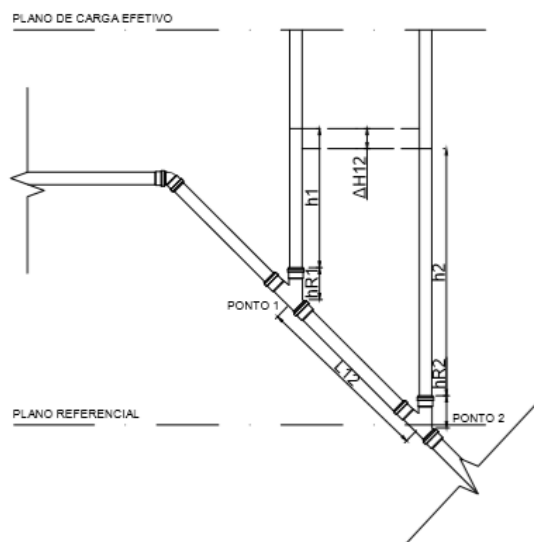
Q é a vazão escoada no tubo;

L é o comprimento do trecho onde é analisada a perda de carga;

D é o diâmetro.

A determinação do coeficiente de Flamant pode ser obtido aplicando-se a Equação 1 entre os pontos 1 e 2 apresentados na Figura 2, com referencial em 1, tem-se:

Figura 2 - Relação entre as cargas hidráulicas nos piezômetros



Fonte: Adaptado de SANTOS e MAIA, 2015.

$$h_{R1} + h_1 + L_{12} \sin 45 = h_2 + \Delta H_{12} + h_{R2}$$

Mas como $h_{R1} = h_{R2}$

$$h_1 + L_{12} \sin 45 = h_2 + \Delta H_{12}$$

Isolando a perda de carga e substituindo a Equação 2, obtém-se:

$$h_f = \Delta H_{12} = 6,1b \frac{l}{D^{4,75}} Q^{1,75} = (h_1 - h_2) + L_{12} \sin 45$$

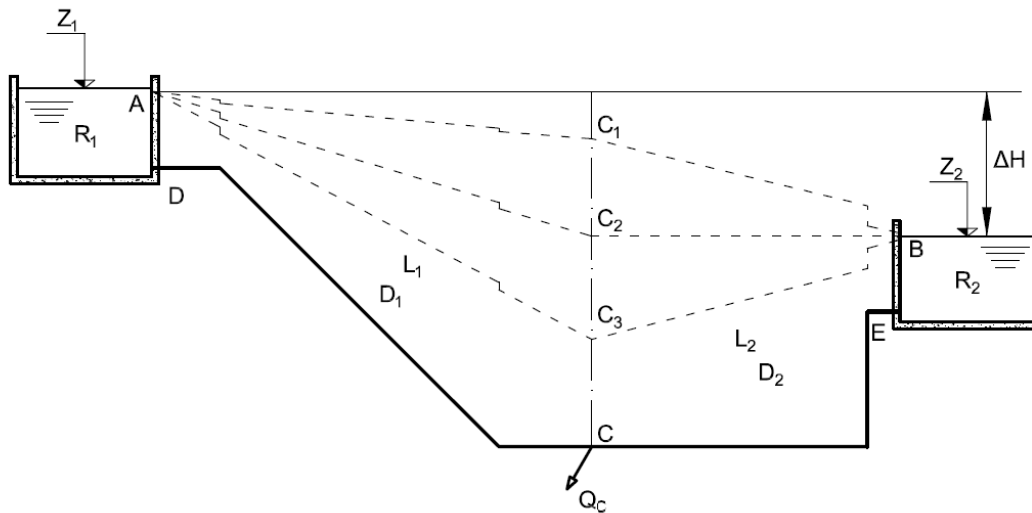
Isolando b na equação acima e fazendo $l = L_{12}$, tem-se a Equação 3 para o cálculo do coeficiente b de Flamant.

$$b = \frac{(h_1 - h_2) + L_{12} \sin 45}{6,1 \frac{L_{12}}{D^{4,75}} Q^{1,75}} \quad (3)$$

3.1.2 Tomada intermediária entre dois reservatórios

Uma rede de distribuição de água pode ser abastecida por dois reservatórios em cotas distintas, como apresentado na Figura 3, onde a rede se inicia no ponto C. O reservatório de cota superior (R_1) sempre abastecerá o sistema. Já o reservatório inferior (R_2) pode abastecer o sistema, sendo denominado reservatório de compensação, e também pode ser abastecido, neste caso sendo denominado reservatório de sobra.

Figura 3 - Disposição das linhas piezométricas entre dois reservatórios



Fonte: SANTOS e MAIA, 2015.

A cota energética no ponto C determina a função de R_2 . No caso da demanda no ponto C ser grande, ou seja, com baixa cota energética como apresentada pela linha energética C_3 , o reservatório será abastecedor, caso contrário ele será abastecido, sendo essa situação representada pela linha energética C_1 . Para o caso da linha energética C_2 , R_2 não será abastecido nem abastecedor.

No esquema da Figura 4 denominam-se de ponto “a”, “b” e “c”, respectivamente, os níveis d’água dos reservatórios R_1 e R_2 , e o ponto onde um “tê” interliga o fluxo de ambos os reservatórios.

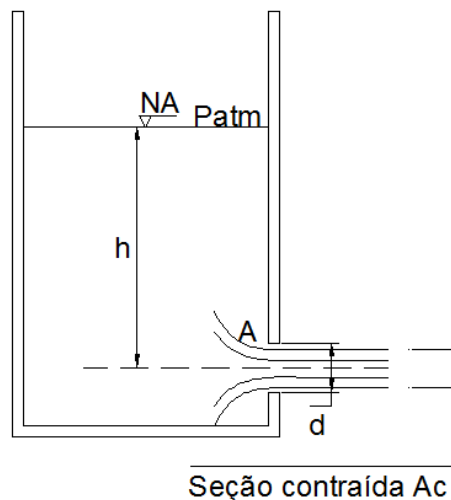
reservatório R_2 deverá abastecer o sistema, sendo para valores menores de vazão o R_2 será abastecido.

3.2 Orifícios

Define-se como orifício uma abertura de perímetro fechado, de forma geométrica definida (circular, retangular, triangular etc.) realizada na parede ou no fundo de um reservatório ou na parede de um canal ou conduto em pressão, pela qual o líquido em repouso ou movimento escoar em virtude da energia potencial e/ou cinética que possui. A Figura 5 mostra o esquema de um orifício, no qual são apresentadas suas dimensões características, tais como carga hidráulica (h), diâmetro do orifício (d), área do orifício (A) e seção contraída do jato d'água (A_c).

Essas estruturas são utilizadas, geralmente, para controle de vazão, tomadas d'água em sistemas de abastecimentos, projetos de irrigação e drenagem, bacias de retenção para controle de cheias urbanas, projetos hidrelétricos, estações de tratamento de água e de esgotos, entre outros.

Figura 3 - Dimensões características de um orifício



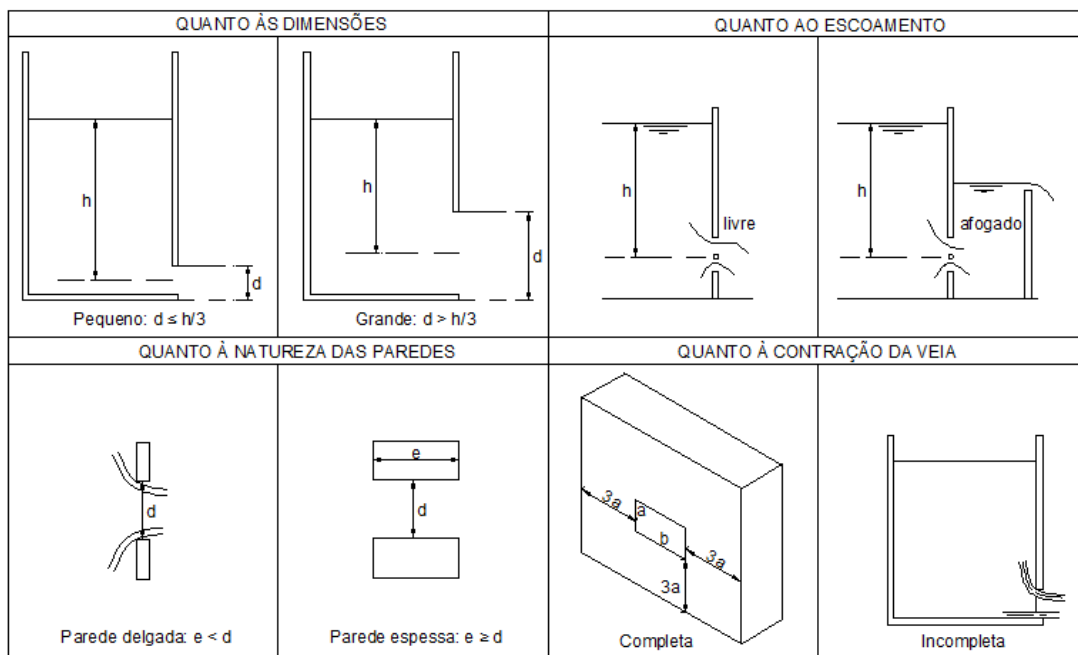
Fonte: Adaptada de Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

3.2.1 Classificação dos orifícios

Para classificar os orifícios existem vários critérios que levam em consideração suas principais características, tais como forma, dimensão, natureza das paredes, orientação do plano do orifício em relação à superfície livre do líquido, contração da veia e tipo de escoamento.

Quanto à forma, podem ser triangular, retangular, circular ou misto. Quanto à dimensão, podem ser pequenos, se o diâmetro do orifício for menor ou igual a um terço da carga hidráulica, ou grandes, caso contrário. Quanto à natureza da parede, podem ser de parede delgada, se a espessura da parede for menor que a altura do orifício, ou de parede espessa, em caso contrário. Quanto à orientação do plano do orifício em relação à superfície livre do líquido, podem ser verticais, horizontais ou inclinadas. Quanto à contração da veia, pode ser completa, caso o orifício tenha contração em todos seus lados, ou incompleta, caso pelo menos um lado não tenha contração. E quanto ao tipo de escoamento, podem ser livres, se a água escoar para o local submetido à pressão atmosférica, ou afogado, se escoar para um local submetido a uma pressão diferente da atmosférica. Tais características podem ser observadas na Figura 6.

Figura 4 – Classificação dos orifícios



Fonte: Adaptado de UTFPR, 2016.

3.2.2 Vazão descarregada por um orifício

Ao fazer o cálculo da vazão deve-se levar em consideração alguns coeficientes para correção. Isto porque nas aplicações práticas, nem as perdas

de energia, nem a contração da veia podem ser negligenciadas, uma vez que o conjunto dos dois efeitos faz com que a vazão efetivamente descarregada seja aproximadamente 60% da vazão que teoricamente passaria pelo orifício. Logo, percebe-se que este assunto, apesar de ser escrito por formulações simples, necessita do auxílio da experimentação para o levantamento de coeficientes que corrijam as equações teóricas. Deve atentar-se ao fato de que tais coeficientes experimentais, apresentados em literatura, dependem do tipo e forma da abertura e da carga sobre o orifício, entre outros fatores, o que pode gerar uma variação entre valores recomendados por fontes distintas.

Os coeficientes utilizados para correção são o de contração, de velocidade e de descarga. O coeficiente de contração (C_c) é dado pela razão entre a área da seção contraída e a área do orifício (Equação 7), além disso depende das paredes do reservatório, do tipo de contração e do tipo do orifício, podendo variar entre 0,60 e 0,64. O coeficiente de velocidade (C_v) é dado pela razão entre a velocidade real de saída do fluido - considerando o fluido real e efeito de parede - e velocidade teórica com que o fluido deixa o orifício (Equação 8), em geral varia entre 0,970 e 0,985. O coeficiente de descarga (C_d) é dado pelo produto entre o coeficiente de contração e o de velocidade; depende da forma geométrica, dimensões e valor da carga; o valor médio prático é de 0,61 para orifícios circulares de parede delgada. Os valores dos coeficientes são encontrados experimentalmente, os quais são apresentados em tabelas presentes nos livros como Lencastre (1972), Avila (1994), Balloffet *et al* (1952), entre outros.

$$C_c = \frac{A_c}{A} \quad (7)$$

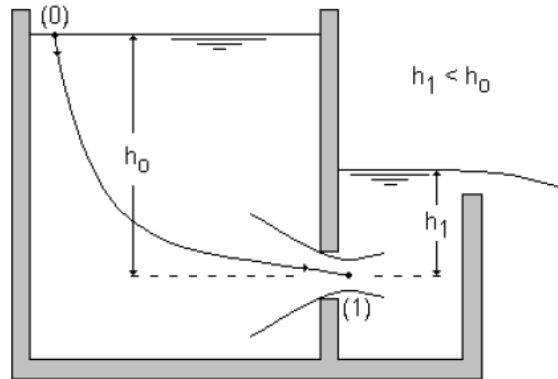
$$C_v = \frac{v_r}{v_t} \quad (8)$$

3.2.3 Orifícios afogados de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa

Para orifícios afogados, pequenas dimensões, parede delgada, com contração completa, pode-se admitir que as partículas que o atravessam têm velocidades iguais, sendo assim, pode-se aplicar a equação de Bernoulli

(Equação 9) entre os pontos “0” e “1” com referencial em “1”, conforme Figura 7.

Figura 5 - Orifício afogado, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa



Fonte: Porto, 2006.

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \quad (5)$$

Em que

$\frac{p_i}{\gamma}$ é a carga de pressão;

Z_i é a carga de elevação;

$\frac{v_i^2}{2g}$ é a carga cinética.

Adotando p_0 igual à pressão atmosférica efetiva que é zero, v_0 desprezível e z_1 igual à zero, z_0 igual à h_0 , p_1/γ igual à h_1 , v_1 igual à v_t , e isolando v_t obtém-se a velocidade teórica (Equação 10).

$$v_t = \sqrt{2g(h_0 - h_1)} \quad (10)$$

Para obter a velocidade real de escoamento, multiplica-se a velocidade teórica pelo coeficiente de velocidade, resultando na Equação 11.

$$v = C_v \sqrt{2g(h_0 - h_1)} \quad (11)$$

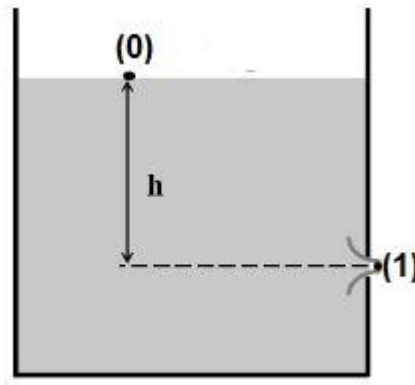
Tem-se que vazão é dada pelo produto entre a área e a velocidade. Adotando a área igual à área do orifício e velocidade igual à velocidade teórica de escoamento, obtém-se a Equação 12 para cálculo de vazão de um orifício afogado de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa.

$$Q = C_d A \sqrt{2g(h_0 - h_1)} \quad (12)$$

3.2.4 Orifícios livres, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa

Utilizando a Equação 9 entre os pontos “0” e “1” com referencial em “1” conforme a Figura 8, e adotando p_0 e p_1 iguais à pressão atmosférica efetiva que é zero, v_0 desprezível e z_1 igual à zero, z_0 igual à h , v_1 igual à v_t , e isolando v_t obtém-se a velocidade teórica (Equação 13).

Figura 6 - Orifício livre de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa



Fonte: Adaptada de Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

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

Para obter a velocidade real de escoamento, multiplica-se a velocidade teórica pelo coeficiente de velocidade, resultando na Equação 14.

$$v = C_v \sqrt{2gh} \quad (14)$$

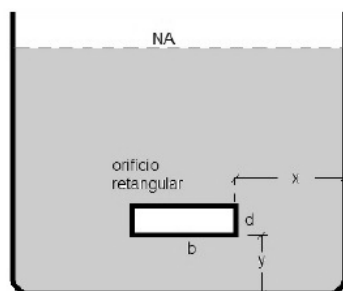
Tem-se que vazão é dada pelo produto entre a área e a velocidade. Adotando área igual à área do orifício e velocidade igual à velocidade teórica de escoamento, obtém-se a Equação 15 para o cálculo de vazão de um orifício livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa.

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (15)$$

3.2.5 Orifícios livres, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração incompleta

Quando as paredes ou fundo do reservatório localizam-se a distâncias inferiores a $3d$, sendo d a menor dimensão em orifícios retangulares, como mostra a Figura 9, diz-se que a contração é incompleta.

Figura 7 - Orifício livre, de pequena dimensão, em parede delgada e com contração incompleta



Fonte: Adaptado de Porto, 2006.

Neste tipo de orifício é necessário corrigir o coeficiente de vazão, de um orifício com contração incompleta (C'_d), através de equações empíricas. Dessa forma, a vazão é dada pela Equação 16.

$$Q = C'_d A \sqrt{2gh} \quad (16)$$

Onde, para orifícios retangulares, C'_d é dado pela Equação 17.

$$C'_d = C_d(1 + 0,15K) \quad (17)$$

Sendo K a razão entre o perímetro não contraído e o perímetro total.

3.2.6 Bocais

Bocal ou tubo adicional é um dispositivo de mesma geometria do orifício com um certo comprimento de tubo, que varia de 1,5 a 5,0 vezes o diâmetro do orifício. Ele tem como função dirigir o jato para uma determinada posição e alterar o coeficiente de vazão de um orifício.

3.2.7 Classificação de bocal

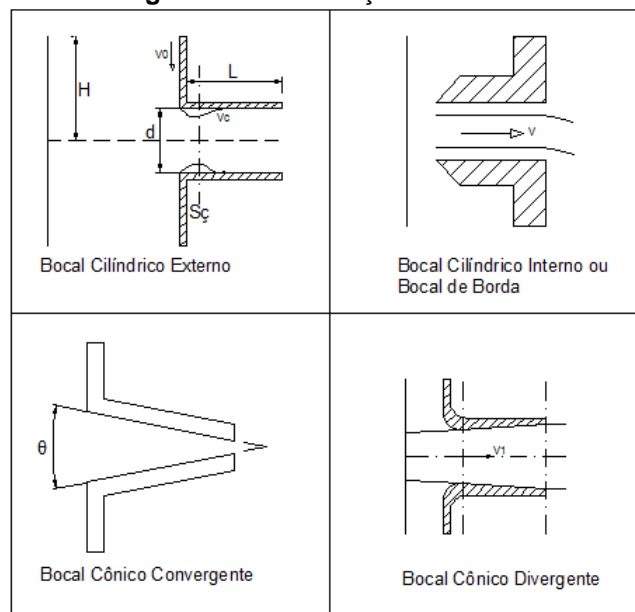
Os bocais podem ser classificados de acordo com sua geometria e dimensões relativas. Podem ser cilíndricos (externos ou internos) ou cônicos (convergentes ou divergentes) e bocais curtos, longos ou padrão, conforme apresentados na Figura 10.

Nos bocais cilíndricos, o tamanho da abertura não varia ao longo do comprimento. Se for externo, a peça adaptada fica para o lado de fora do reservatório e a vazão é maior que a de um orifício de mesmo diâmetro, já que há formação de seção contraída. Se for interno, a peça adaptada fica para o lado de dentro do reservatório e a vazão é menor que a de um orifício de mesmo diâmetro, já que pode não haver formação de seção contraída e, caso seja lâmina livre, a água não encherá completamente o tubo.

Nos bocais cônicos, o tamanho da abertura varia ao longo do comprimento. Se for convergente, o tamanho da abertura diminui ao longo do comprimento do bocal. Se for divergente (também conhecido como difusor), o tamanho da abertura aumenta ao longo do comprimento do bocal.

No que diz respeito às dimensões relativas, os bocais são curtos se o comprimento for menor que o diâmetro do bocal, são longos se o comprimento for maior ou igual ao diâmetro do bocal e são denominados padrão se o comprimento for 2,5 vezes o diâmetro do bocal.

Figura 8 - Classificação dos bocais



Fonte: Adaptado de UTFPR, 2004.

3.2.8 Cálculo de vazão descarregada por bocal

Do ponto de vista prático, o escoamento continua sendo considerado da mesma forma que em orifícios. Com isso, a Equação 15 continua sendo utilizada. Entretanto, a carga hidráulica é a diferença de nível entre a superfície do reservatório e a linha de centro da seção de saída do tubo, pois o bocal nem sempre estará na horizontal. Assim, a carga h passa a ser H , resultando então na Equação 20.

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (18)$$

Valores de C_d do bocal são dados na Tabela 2.

Tabela 1 - Valores do coeficiente de vazão para bocais

L/D	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	5,0
C_d	0,60	0,75	0,78	0,79	0,80	0,82	0,79

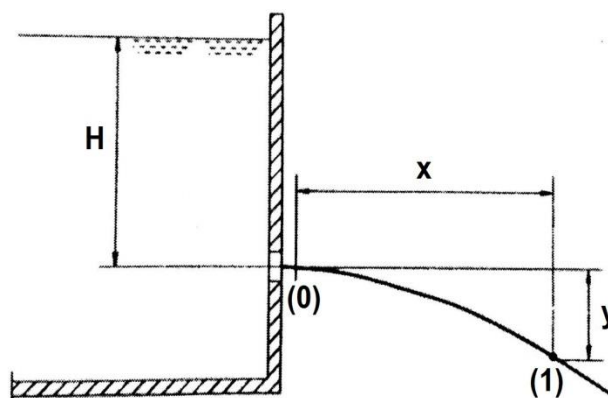
Fonte: PORTO, 2006.

3.2.9 Determinação da velocidade real do jato d'água utilizando coordenadas cartesianas

A velocidade real de um jato pode ser medida por meio de um tubo de Pitot instalado na seção contraída do jato ou então pelo método das coordenadas, no qual utiliza o princípio da Cinemática, que será descrito a seguir.

A Figura 11 mostra um reservatório de parede vertical. Devido a ação da força gravitacional, o jato tem uma trajetória do tipo parabólica. Considerando x e y as coordenadas no ponto (1) da trajetória do jato, pode-se utilizar as equações da cinemática para as direções horizontal e vertical, desprezando-se a resistência do ar.

Figura 9 – Trajetória do jato no sistema de coordenadas cartesianas em orifícios



Fonte: Adaptado de Porto, 2006.

As equações da cinemática são as Equações 19 e 20.

$$x = x_o + v_{0x}t \quad (19)$$

Em que

x é a posição do jato no ponto (1);

x_o é a posição do jato no ponto (0);

v_{0x} é a velocidade com que o jato sai do orifício;

t é o tempo que o jato leva para chegar ao ponto (1).

$$y = y_o + v_{0y}t + \frac{gt^2}{2} \quad (20)$$

y é a posição do jato no ponto (1);

y_o é a posição do jato no ponto (0);

v_{0y} é a velocidade com que o jato sai do orifício;

t é o tempo que o jato leva para chegar ao ponto (1);

g é a aceleração da gravidade.

Considerando a origem do plano cartesiano no ponto (0), do qual sai um jato com velocidade igual a V , na direção horizontal, substituindo a velocidade inicial e isolando o tempo nas duas equações acima tem-se as Equações 21 e 22.

$$x = Vt \quad (21)$$

$$y = -\frac{gt^2}{2} \quad (22)$$

Isolando t na Equação 21 e substituindo na equação Equação 22, chega-se a equação de trajetória do jato d'água (Equação 23).

$$y = -\frac{gx^2}{2V^2} \quad (23)$$

Logo, isolando V na Equação 23, obtém-se a velocidade real do jato, dada pela Equação 24.

$$V = x \left(\frac{g}{2y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Sabendo-se que C_v é a razão entre a velocidade real e a velocidade teórica, a equação para o C_v é dada pela Equação 25.

$$C_v = \frac{x}{2} \left[\frac{1}{hy} \right]^{0,5} \quad (25)$$

3.2.10 Escoamento sob carga variável

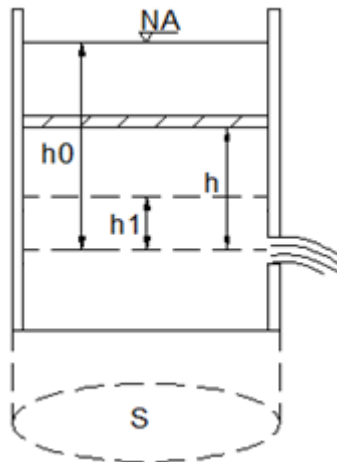
O escoamento através de um orifício visto até agora, era dito permanente, ou seja, a carga hidráulica h sobre o orifício era constante. A partir de agora, assume-se o pressuposto que a carga varia, fazendo com que a vazão escoada se torne uma função do tempo.

Durante o esvaziamento de um reservatório por meio de um orifício de pequena dimensão, a altura h diminui com o tempo. Com a redução de h , a vazão Q também irá decrescendo. Na Figura 12 é apresentado um orifício com coeficiente de vazão C_d , área A constante e um reservatório com área da base igual a S .

A vazão descarregada por um orifício pequeno e descarga livre é dada pela Equação 17. Lembrando que $v = Qt$, para um pequeno intervalo de tempo dt , a vazão escoada pelo orifício é dada pela Equação 26.

$$\frac{dv}{dt} = C_d A \sqrt{2gh} \quad (26)$$

Figura 10 - Escoamento sob carga variável em um reservatório



Fonte: Adaptado do Porto, 2006.

Nesse mesmo intervalo de tempo, o nível de água no reservatório abaixará numa altura dh , com isso $dv = Sdh$. Substituindo na Equação 26, e colocando o sinal negativo para indicar que o reservatório está esvaziando, tem-se a Equação 27.

$$\frac{-Sdh}{dt} = C_d A \sqrt{2gh} \quad (27)$$

Isolando o termo dt

$$dt = -\frac{Sh^{-\frac{1}{2}}}{C_d A \sqrt{2g}} dh \quad (28)$$

Integrando em ambos os lados, sendo o primeiro membro num intervalo de tempo de 0 a T e o segundo membro de h_0 a h_1 , tem-se a expressão para o tempo de esvaziamento de um reservatório (Equação 29).

$$T = \frac{2S}{C_d A \sqrt{2g}} [\sqrt{h_0} - \sqrt{h_1}] \quad (29)$$

4 METODOLOGIA

4.1. Elaboração de roteiro para o aparato já existente

O desenvolvimento do roteiro para aula prática foi baseado no aparato construído por Santos e Maia (2015). Os autores construíram o aparato com barriletes de PVC de aproximadamente 20 L, tubulação de ½” em acrílico, peças especiais em latão e PVC, bomba centrífuga de ½ cv, tubulação da instalação de recalque de 1” no trecho de sucção e ¾” no trecho de recalque, ambas em PVC, como está ilustrado na Figura 13.

O trecho de recalque possui uma bifurcação, de onde são gerados três seguimentos, um segue para R_1 , outro para R_2 , ambos com rotâmetros instalados, e por último um seguimento para o reservatório de abastecimento geral. Foram divididos em sistemas integrados que poderão funcionar isoladamente, fechando os registros.

Figura 11 - Aparato experimental executado no Laboratório de Engenharia Civil



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.1 Determinação do coeficiente de Flamant

O diâmetro da tubulação utilizada no aparato é de 15,60 mm. Para o diâmetro utilizado, é recomendada a utilização da fórmula de Flamant. Realizaram-se testes variando a vazão (Q) e medindo-se os valores de h_1 e h_2

indicados na Figura 2. O valor de “b” é calculado aplicando-se esses valores na Equação 3 sabendo que $L_{12} = 21,5 \text{ cm}$.

4.1.2 Tomada intermediária entre dois reservatórios

Para realização do experimento de uma tomada intermediária entre dois reservatórios, controlou-se uma vazão no rotâmetro instalado na tubulação que abastece R_1 e verificou-se pelo método direto. Mediu-se os níveis d’água nos reservatórios R_1 e R_2 . Como são necessárias as cargas de elevação nos referidos níveis d’água, então somou-se 0,19 m ao valor de “ h_a ”, sendo que este valor representa o desnível entre o fundo do reservatório R_1 e o plano de referência adotado.

De posse destes níveis, calculou-se a vazão dada pela Equação 6. Comparou-se a vazão lida no rotâmetro com esse valor calculado. Na Equação 6, utilizou-se para o valor de l_{ac} o valor do comprimento virtual total dado na Tabela 3, somado com o comprimento retilíneo no trecho de “a” até “c”. Ressalta-se também que o valor de “b” utilizado será o valor encontrado no experimento anterior.

Tabela 2 - Comprimentos equivalentes

Peças especiais	Quantidade	Le (m)	Le x Quantidade (m)
Saída de canalização	1	0,4	0,4
Joelho 90°	2	0,5	1,0
Joelho 45°	2	0,3	0,6
Tê passagem direta	2	0,3	0,6
Tê passagem lateral	1	0,3	0,3
Total (m)			2,9

Fonte: Elaborado pelos autores.

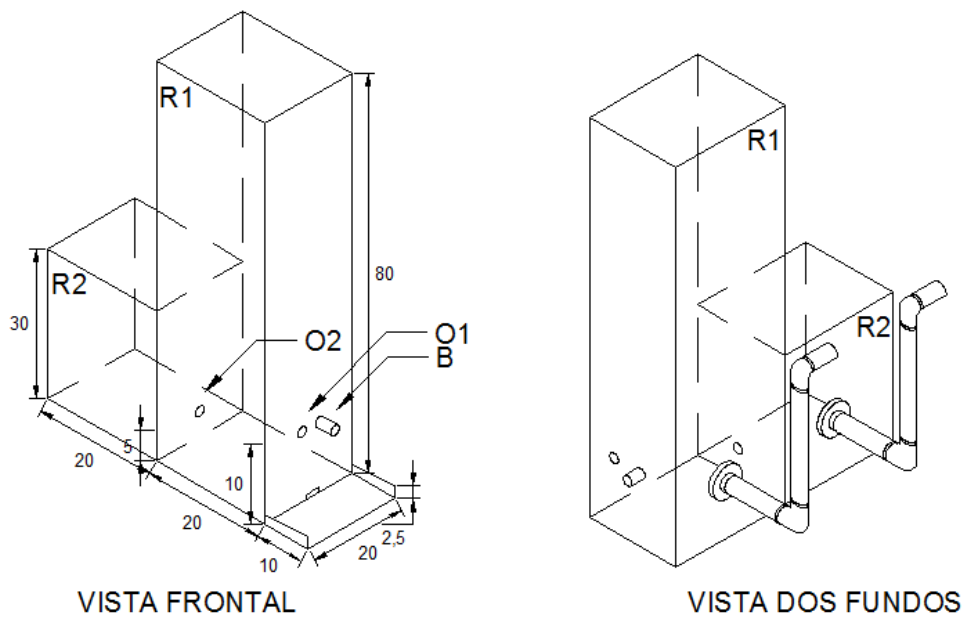
4.2 Elaboração e construção de um novo aparato

Foi desenvolvido um aparato de modo a realizar o máximo de práticas possíveis referentes ao conteúdo teórico da disciplina de Hidráulica, mais especificamente, orifícios e bocais, levando em consideração o reaproveitamento da água.

Na execução do aparato, utilizou-se vidro de 5,00 mm de espessura para a construção dos reservatórios, de aproximadamente 28,0 L para o reservatório R_1 e 12,0 L para o reservatório R_2 . Os reservatórios possuem três orifícios e um bocal, sendo o orifício livre ($O1$) e o bocal (B) de diâmetro igual a 9,00 mm, o orifício afogado ($O2$) de diâmetro 8,00 mm e o orifício retangular de

1,10 mm de altura e 3,34 mm de comprimento. As dimensões do aparato e a localização dos orifícios estão representadas na Figura 14. O aparato será abastecido por uma bomba, que tem sua vazão controlada por um rotâmetro. Também foram utilizadas tubulações de PVC, flanges de caixa d'água, joelhos e luvas de correr para a montagem do extravasor, responsável por controlar o nível de água do reservatório.

Figura 12 - Esquema representativo do aparato



autori

4.2.1 Determinação do coeficiente de descarga de um bocal e de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa

Utilizando um béquer, a água do orifício e do bocal foi coletada separadamente. Com o auxílio de um cronômetro e de uma balança, a vazão em massa foi obtida. A partir da vazão encontrada, da carga hidráulica (h) medida para este caso e da área do orifício, obteve-se os coeficientes de descargas, para o bocal e para o orifício, através da Equação 30.

$$C_d = \frac{Q}{A\sqrt{2gh}} \quad (30)$$

4.2.2 Determinação do tempo de esvaziamento do reservatório

Para determinação do tempo de esvaziamento do reservatório foi necessário o conhecimento das cotas dos níveis h_0 e h_1 , indicados na Figura 12. Inicialmente, estipulou-se um tempo (t) de esvaziamento. Depois, mediu-se a altura (h_0) inicial da água e, após o tempo estipulado, mediu-se a altura (h_1) final. Com o C_d calculado pela Equação 30, no experimento anterior, obteve-se o tempo total de esvaziamento calculado pela Equação 29. Esse experimento foi feito tanto para orifício quanto para o bocal, com a finalidade de comparar o tempo de esvaziamento para ambos os dispositivos.

4.2.3 Determinação da velocidade real do jato e do coeficiente de velocidade de um orifício livre, de parede delgada e com contração completa utilizando coordenadas cartesianas

Para este experimento foi necessário um transferidor e um barbante com pontos de referência. Com o auxílio desses dispositivos as coordenadas cartesianas de qualquer ponto do jato d'água foram obtidas. A altura do centro do orifício até o nível d'água (h) também foi medida. Utilizando-se as Equações 24 e 25, as coordenadas obtidas e a altura medida, chegou-se aos valores de velocidade real do jato e coeficiente de velocidade do orifício livre, de parede delgada e com contração completa.

4.2.4 Determinação do coeficiente de descarga para um orifício retangular, com descarga livre, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração incompleta

Utilizando um béquer, a água descarrega pelo orifício foi coletada. Com o auxílio de um cronômetro e de uma balança, a vazão em massa foi obtida. A partir da carga hidráulica (h) medida para este caso, da área do orifício e da vazão medida, obteve-se o coeficiente de descarga corrigido, utilizando-se a Equação 16 e o coeficiente de descarga através da Equação 17.

4.2.5 Determinação do coeficiente de descarga para orifício circular, afogado, de pequenas dimensões, em parede delgada e com contração completa

Utilizando um béquer, a água do orifício foi coletada pelo ladrão. Com o auxílio de um cronômetro e de uma balança, a vazão em massa foi obtida. A

partir das cargas hidráulicas (h_0 e h_1) sobre o orifício, conforme a Figura 7, da área do orifício e da vazão medida, obteve-se o coeficiente de descarga pela Equação 12.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Elaboração de roteiro para o aparato já existente

O roteiro elaborado está apresentado no Apêndice A. A seguir, serão apresentados os resultados encontrados para os experimentos realizados no aparato já existente.

5.1.1 Determinação do coeficiente de Flamant do tubo em acrílico

Na Tabela 4, observam-se os dados de vazões obtidas experimentalmente e o coeficiente de Flamante calculado pela Equação 2.

Tabela 3 - Determinação do coeficiente de Flamant

Q (m ³ /s)	$(h_1 - h_2)$ (m)	b (s ^{1,75} /m ^{0,5})
$9,30977 \times 10^{-5}$	-12,5333	$6,03052 \times 10^{-4}$
$1,18027 \times 10^{-4}$	-12,5333	$4,57793 \times 10^{-4}$
$1,52642 \times 10^{-4}$	-11,7667	$3,26748 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborado pelos autores.

O valor médio obtido no experimento para o coeficiente de Flamant do acrílico é de $4,6253 \times 10^{-4} \text{ s}^{1,75}/\text{m}^{0,5}$. O coeficiente do tubo PVC é $1,35 \times 10^{-4} \text{ s}^{1,75}/\text{m}^{0,5}$ e o de aço é $2,3 \times 10^{-4} \text{ s}^{1,75}/\text{m}^{0,5}$, segundo Santos e Maia (2015). O valor encontrado não é satisfatório, visto que era esperado para o coeficiente do acrílico um resultado menor que os de parâmetro por ser um tubo liso. Esta incoerência ocorre devido à incapacidade da bomba fornecer uma vazão constante, bem como a turbulência gerada pela tubulação de entrada e imprecisões na medição.

5.1.2 Tomada intermediária entre dois reservatórios

Através dos dados medidos em laboratório e utilizando-se a Equação 7, obteve-se os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Valores referentes às vazões medidas e calculadas

h_a (m)	h_b (m)	Q_{medida} (m ³ /s)	$Q_{calculada}$ (m ³ /s)
27,80	26,40	$1,4948 \times 10^{-4}$	$6,5102 \times 10^{-5}$
31,30	16,20	$1,8203 \times 10^{-4}$	$8,7316 \times 10^{-5}$
25,40	21,30	$1,1583 \times 10^{-4}$	$6,9894 \times 10^{-5}$

Fonte: Elaborado pelos autores.

Neste experimento, nota-se que os valores de vazões obtidos foram diferentes dos valores calculados. Deve-se atribuir tal fato a flutuações da vazão durante a medição, sendo essas flutuações devidas ao superaquecimento da bomba, à turbulência no abastecimento do reservatório e à dificuldade em manter o nível dos reservatórios constantes.

5.2 Construção de um novo aparato e elaboração de novas práticas

A Figura 15 representa o aparato elaborado que será utilizado na realização das práticas, podendo ajudar os alunos na maior compreensão da teoria de orifícios e bocais. O roteiro desta prática está apresentado no Apêndice B.

Figura 13 - Aparato desenvolvido para realização de experimentos em orifícios e bocais



Fonte: Elaborado pelos autores

5.2.1 Determinação do coeficiente de descarga de um bocal e de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa

Através dos dados de vazões (Q) e cargas hidráulicas (h) medidas e utilizando a Equação 30, obteve-se os valores dos coeficientes de descargas do orifício, apresentados na Tabela 6, e do bocal, os quais estão na Tabela 7.

Tabela 6 – Valores de vazão e carga hidráulica medidos e dos coeficientes de descargas calculados para o orifício

Q_{medida} (m ³ /s)	h (m)	C_d
$1,36660 \times 10^{-4}$	0,525	0,6693
$1,15130 \times 10^{-4}$	0,525	0,5639
$1,18391 \times 10^{-4}$	0,525	0,5798

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 7 - Valores de vazão e carga hidráulica medidos e dos coeficientes de descargas calculados para o bocal

Q_{medida} (m ³ /s)	h (m)	C_d
$1,58624 \times 10^{-4}$	0,538	0,7675
$1,59920 \times 10^{-4}$	0,538	0,7737
$1,55785 \times 10^{-4}$	0,538	0,7537

Fonte: Elaborado pelos autores

Os valores médios obtidos foram de aproximadamente 0,60 para o orifício e de 0,77 para o bocal. Tais valores são próximos aos sugeridos por Porto (2006), que são 0,61 e 0,82 para orifício e bocal respectivamente, o que comprova que o aparato é eficiente na determinação de C_d para orifícios circulares livres, pequenos, com descarga livre, parede delgada e contração completa e para bocal. Vale salientar que, como esperado, o valor de C_d para o bocal é maior que para o orifício, visto que o bocal descarrega uma vazão maior que o orifício. Isso pode ser explicado pela zona de sucção que ocorre dentro do bocal, devido à contração existente.

5.2.2 Determinação do tempo de esvaziamento do reservatório

Utilizando-se a Equação 29 e por meio dos dados medidos em laboratório apresentados na Tabela 8 e Tabela 9, podem-se obter valores para o tempo de esvaziamento do reservatório quando se utiliza o orifício ou o bocal.

Tabela 8 – Tempos de esvaziamento do reservatório quando se utiliza o orifício

h_0 (m)	h_1 (m)	C_d	T (s)
0,400	0,380	0,60	7,66

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 9 - Tempos de esvaziamento do reservatório quando se utiliza o bocal

h_0 (m)	h_1 (m)	C_d	T (s)
0,400	0,380	0,77	5,97

Fonte: Elaborado pelos autores

Os valores médios obtidos foram de 7,66 segundos para o orifício e de 5,97 segundos para o bocal. Observa-se que o tempo de esvaziamento do orifício é maior que o do bocal, conforme o esperado, visto que o coeficiente de descarga do bocal é maior. Isso ocorre, pois na contração ocorrida dentro dele, gera-se uma zona de sucção o que, conseqüentemente, aumenta a descarga.

5.2.3 Determinação da velocidade real do jato e do coeficiente de velocidade de um orifício livre, pequeno, de parede delgada e com contração completa utilizando coordenadas cartesianas

Com base nas coordenadas do jato e carga hidráulica medidas e através das Equações 24 e 25, os valores de velocidade do jato d'água e do coeficiente de velocidade do orifício foram calculados e estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 5 - Velocidade do jato d'água e coeficiente de velocidade

x (m)	y (m)	h (m)	v (m/s)	C_v
0,2660	-0,0583	0,4855	2,44	0,790
0,5011	-0,1716	0,4855	2,68	0,870
0,6453	-0,3215	0,4855	2,52	0,820

Fonte: Elaborado pelos autores

O valor médio da velocidade obtida foi 2,55 m/s e o do coeficiente de velocidade foi 0,830. O valor encontrado deste coeficiente está um pouco

distante da literatura, o qual, segundo Porto (2006), está entre 0,970 e 0,985. Tal divergência entre os valores é causada pela imprecisão do aparato, como inexatidão do transferidor e da corda usados para medir as coordenadas do jato.

5.2.4 Determinação do coeficiente de descarga para um orifício retangular, descarga livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração incompleta

Através das medições realizadas experimentalmente, e com a Equação 16 e a Equação 17, obtém-se os valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 6 - Coeficiente de descarga corrigido

$Q_{medida} (m^3/s)$	$h(m)$	K	C'_d	C_d
$4,98732 \times 10^{-4}$			0,61	0,56
$4,13754 \times 10^{-4}$	0,25	0,6238	0,51	0,46
$4,92923 \times 10^{-4}$			0,61	0,55

Fonte: Elaborado pelos autores

O valor médio do coeficiente de descarga (C_d) obtido é 0,53, considerado satisfatório, uma vez que está muito próximo do teórico encontrado em literaturas, cujo valor é 0,61 conforme o Porto (2006).

5.2.5 Determinação do coeficiente de descarga para orifício circular, afogado, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa

Após as medições no laboratório e de posse da Equação 12, o valor do coeficiente de descarga pode ser encontrado na Tabela 12.

Tabela 7 – Valores de cargas hidráulicas (h_0 e h_1) e vazão medidos e coeficiente de descarga calculado para o orifício afogado

$h_0(m)$	$h_1(m)$	$Q_{medida} (m^3/s)$	C_d
0,5275	0,2240	$1,15320 \times 10^{-4}$	0,74
0,5275	0,2240	$1,13996 \times 10^{-4}$	0,73
0,5275	0,2240	$1,12165 \times 10^{-4}$	0,73

Fonte: Elaborado pelos autores

O valor médio encontrado para o coeficiente de descarga é 0,73. Este valor não é satisfatório já que não está próximo ao encontrado na literatura,

cujo valor é 0,61 conforme Porto (2006). Tal erro é justificável pela falta de precisão na coleta dos dados e da posição do extravasor no reservatório 2, que possivelmente criou uma linha de fluxo.

6 CONCLUSÃO

Inicialmente este trabalho objetivava a elaboração de um roteiro didático para a aula prática, para determinação das vazões de escoamento, quando se tem uma tomada de água entre dois reservatórios e o coeficiente de Flamant para tubulação em acrílico. Em relação à este tópico, pôde-se concluir que os resultados obtidos para o material utilizado, em comparação com outros materiais, não estão dentro do esperado, devido à incapacidade da bomba fornecer uma vazão constante, bem como a turbulência gerada pela tubulação de entrada e imprecisões na medição.

Na determinação do tempo de esvaziamento, percebeu-se que o tempo necessário para esvaziar um reservatório através de um bocal é menor que o tempo gasto por um orifício nas mesmas condições.

Entretanto, na determinação do coeficiente de descarga de um bocal e um orifício e do coeficiente de descarga corrigido para orifício retangular com contração incompleta, bem como na determinação da velocidade real do jato, em comparação com a literatura existente, conclui-se que os resultados obtidos foram satisfatórios.

Porém o coeficiente de velocidade de um orifício e do coeficiente de descarga para orifício circular afogado não foram condizentes com os valores esperados, devido à erros de imprecisão tanto na leitura dos dados quanto na montagem do aparato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVILA, G.S. **Hidráulica Geral**.v.1.,México: Editorial Limusa, 1964.

BALLOFFET, A.; GOTELLI,L.M.; MEOLI,G.A. **Hidráulica**. 2ª ed., Buenos Aires, Biblioteca Ediar de Engenharia, 1952.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. **Fundamentos de Hidráulica**. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20503/IT503%20Cap%207.pdf>>. Acesso em: 10 de setembro de 2016.

Escola de Minas UFOP. **Orifícios e bocais**. Disponível em: <http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~gilbertoqueiroz/CIV225%20Aula2_Orifícios%20e%20Bocais.pdf>. Acesso em: 03 de outubro de 2016

LENCASTRE,A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1972.

Página pessoal UTFPR. **Orifícios, bocais e vertedores**. Disponível em: <[Porto, R. d. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006.](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/fabianaschutz/hidraulica/AULAS%2003%20E%2004%20Orifícios-%20Bocais%20e%20Vertedores.pdf/at_download/file.>>. Acesso em: 03 de outubro de 2016.</p></div><div data-bbox=)

SANTOS, L.; MAIA,W.O. **Projeto e construção de um aparato para as aulas práticas das disciplinas mecânica dos fluidos e hidráulica do curso de Engenharia Civil do Campus Alto Paraopeba**. Ouro Branco, [S.n.], 2015.

APÊNDICE A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
5º Período de Engenharia Civil – 1º semestre de 2017
HIDRÁULICA - Prof. Emmanuel Teixeira

Roteiro da 3ª aula prática – Coeficiente de Flamant e tomada d'água entre dois reservatórios

Grupo de 5 pessoas. Data do envio: Valor:
Enviar as tabelas preenchidas (devem está exatamente iguais a apresentada neste roteiro) e as repostas das questões em um arquivo Word 2007 e PDF para os seguintes e-mails: emmanuel.teixeira@ufsj.edu.br e emmanuel@etev.com.br

Nomes:

1. Coeficiente de Flamant

1.1 Introdução

Em tubulações de diâmetros pequenos (12,5 a 100 mm) não se deve calcular a perda de carga contínua pela equação de Hazen-Williams, a qual é uma das principais equações utilizadas na prática de projetos. O cálculo da perda de carga contínua nesses casos é feito utilizando a Equação de Flamant, tem-se a Equação 1.

$$h_f = 6,1b \frac{L}{D^{4,75}} Q^{1,75} \quad (1)$$

Onde b representa o coeficiente de Flamant.

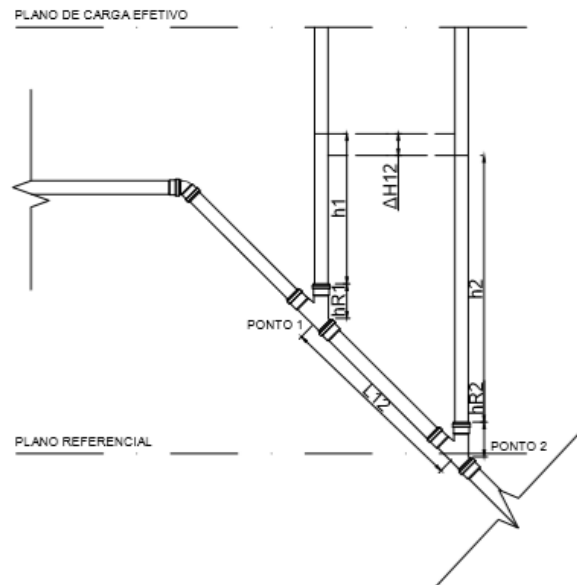
1.2 Determinação do coeficiente de Flamant

O diâmetro da tubulação utilizada no aparato é de 15,60 mm. Para o diâmetro utilizado, é recomendado a utilização da fórmula de Flamant.

Entretanto, é difícil encontrar na literatura o coeficiente b de Flamant para tubulação em acrílico. Portanto, esse experimento visa determinar tal coeficiente.

A Figura 1 mostra um esquema do aparato utilizado nesse experimento.

Figura 1 - Relação entre as medidas do aparato



Fonte: Adaptado de SANTOS e MAIA, 2015.

Aplicando a Equação de Energia entre os pontos 1 e 2 apresentados na Figura 1, com referencial em 1, tem-se:

$$h_{R1} + h_1 + L_{12} \sin 45 = h_2 + \Delta H_{12} + h_{R2}$$

Mas como $h_{R1} = h_{R2}$:

$$h_1 + L_{12} \sin 45 = h_2 + \Delta H_{12}$$

Isolando a perda de carga e substituindo a Equação 1, obtém-se:

$$h_f = \Delta H_{12} = 6,1b \frac{l}{D^{4,75}} Q^{1,75} = (h_1 - h_2) + L_{12} \sin 45$$

Isolando b na equação acima e fazendo $l = L_{12}$, tem-se a Equação 2 para o cálculo do coeficiente b de Flamant.

$$b = \frac{(h_1 - h_2) + L_{12} \sin 45}{6,1 \frac{L_{12}}{D^{4,75}} Q^{1,75}} \quad (2)$$

1.3 Experimento

Objetivo

Determinar o coeficiente b de Flamant, através das fórmulas anteriormente dadas.

Procedimento

Faça a leitura do rotâmetro ligado imediatamente após a bomba e das alturas H_1 e H_2 nos piezômetros. Em seguida, utilize um béquer para calcular a vazão volumétrica: com o auxílio de um cronômetro, verifique a quantidade de litros que escoa por determinado tempo, e anote os valores. Repita o experimento 3 vezes para a mesma vazão. Em seguida, varie a vazão da bomba, e repita todo o procedimento. Esse experimento deverá ser feito com 3 vazões diferentes.

Q rotâmetro (L/s)	L (l)	T (s)	H ₁ (m)	H ₂ (m)

Resultados

L₁₂ (m)	D (m)	Q (L/s)	Q_{media} (m³/s)	Q_{rotâmetro} (m³/s)	H₁ – H₂ (m)	b
0,215	0,0156					

2 Tomada intermediária entre dois reservatórios

2.1 Introdução

Denomina-se de ponto “a”, “b” e “c”, respectivamente, o nível d’água dos reservatórios R1 e R2, e o ponto onde um “tê” liga o fluxo de ambos os reservatórios, como mostrado na Figura 2.

Para o caso de R2 não ser abastecido por R1 e nem abastecer o ponto c, tem-se que a perda de carga entre “a” e “c” é igual à diferença de nível entre “a” e “b”. Como a pressão em “a” é a atmosférica e ainda desconsiderando as cargas cinéticas devido a seu baixo valor, aplicando-se a equação de energia entre “a” e “b”, tem-se a Equação 3.

$$\Delta H_{ac} = Z_a - Z_c \quad (3)$$

Aplicando-se também a equação de energia entre os pontos “b” e “c”, lembrando que não há escoamento no trecho entre esses pontos, como escrito no parágrafo anterior, tem-se a Equação 4.

$$\frac{p_c}{\gamma} = -Z_c + Z_b \quad (4)$$

Igualando a Equação 4 com a Equação 1, obtém-se a Equação 5.

$$\Delta H_{ac} = Z_a - Z_b = 6,1b \frac{l_{ac}}{D^{4,75}} Q_{ac}^{1,75} \quad (5)$$

Isolando a vazão na Equação 5, tem-se a Equação 6, com a qual se pode calcular a vazão que se deve ter para R2 não forneça nem receba água.

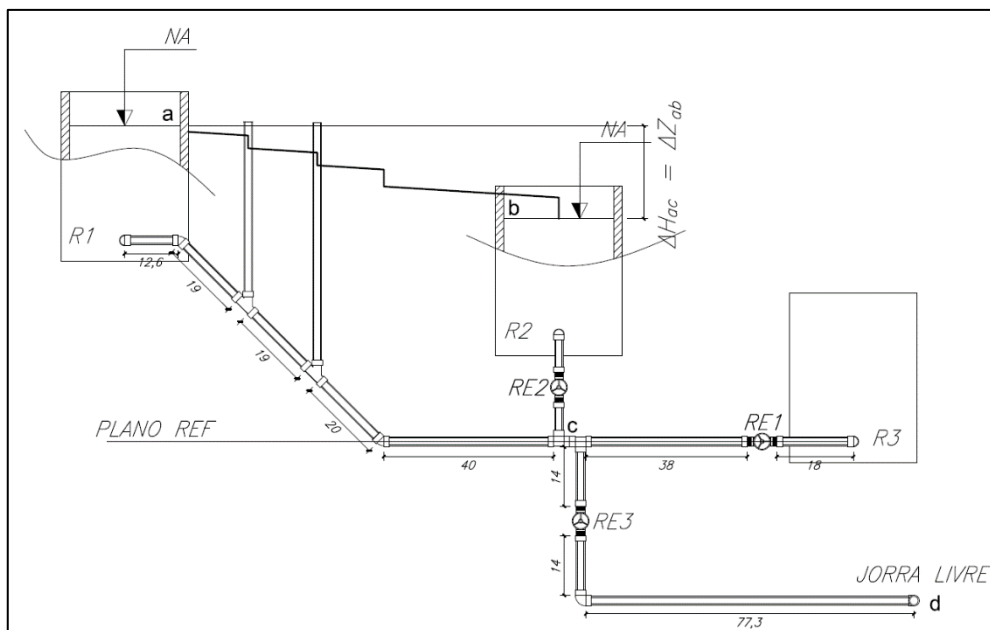
$$\left[\frac{(Z_a - Z_b) D^{4,75}}{6,1b l_{ac}} \right]^{\frac{1}{1,75}} = Q_{ac} \quad (6)$$

Onde:

- Q_{ac} Representa a vazão que sai de R1 (m³/s);
- l_{ac} é o comprimento virtual entre os pontos a e c (m).

Mantidos os níveis d'água (Z_a e Z_b) dos reservatórios R1 e R2 constantes, qualquer valor de vazão maior que a calculada pela Equação 6, o reservatório R2 deverá abastecer o sistema, sendo para valores menores de vazão o R2 será abastecido.

Figura 2 - Perda de Carga entre "a" e "c" (medidas em centímetros).



Fonte: Adaptado de SANTOS e MAIA, 2015.

Objetivo

O experimento consiste em determinar a vazão que torna o reservatório R2 neutro, tanto teoricamente como experimentalmente.

Materiais utilizados

- Béquer;
- Cronometro;
- Fita métrica (régua).

Procedimento

Para realização do experimento, controlou-se uma vazão no rotâmetro instalado na tubulação que abastece R1, e verificada pelo método direto. Mediu-se os níveis d'água (h_a e h_b) nos reservatórios R1 e R2. Como se precisa das cargas de elevação nos referidos níveis d'água, então se somou 0,19 m ao valor de " h_a ", sendo que este valor representa o desnível entre o fundo do reservatório R1 e o plano de referência adotado.

De posse destes níveis, calcula-se a vazão dada pela equação 6. Comparou-se a vazão lida no rotâmetro com esse valor calculado. Atenta-se que na Equação 6 utilizou-se para o valor de l_{ac} o valor do comprimento virtual total dado na Tabela 1 somado com o comprimento retilíneo no trecho de "a" até "c". Ressalta-se também que o valor de "b" utilizado será o valor encontrado no experimento anterior.

Tabela 1 – Comprimento equivalente das peças especiais

Peças especiais	Quantidade	Le (m)	Le x Quantidade (m)
Saída de canalização	1	0,4	0,4
Joelho 90°	2	0,5	1,0
Joelho 45°	2	0,3	0,6
Tê passagem direta	2	0,3	0,6
Tê passagem lateral	1	0,3	0,3
Total (m)			2,9

Fonte: Adaptado de SANTOS e MAIA, 2015.

Vol. (ml)	T (s)	H _a (m)	H _b (m)

Resultado

Q _{medido} (L/min)	Q _{calculado} (L/min)

APÊNDICE B



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

5º Período de Engenharia Civil – 1º semestre de 2017

HIDRÁULICA - Prof. Emmanuel Teixeira

Roteiro – Orifícios e bocais

Grupo de 5 pessoas.

Data do envio:

Valor:

Enviar as tabelas preenchidas (devem estar exatamente iguais às apresentadas neste roteiro) e as repostas das questões em um arquivo Word 2007 e PDF para os seguintes e-mails: emmanuel.teixeira@ufs.edu.br e emmanuel@etev.com.br

Nomes:

1 Orifícios e bocais

1.1 Embasamento teórico

Orifício pode ser definido como uma abertura de perímetro fechado, de forma geométrica bem definida. Situa-se, geralmente, na parede ou no fundo de um reservatório, pela qual o líquido escoar.

Para classificar os orifícios existem vários critérios que levam em consideração suas principais características, tais como forma, dimensão, natureza das paredes, orientação do plano do orifício em relação à superfície livre do líquido, contração da veia e tipo de escoamento.

Bocal ou tubo adicional é um dispositivo de mesma geometria do orifício com um certo comprimento de tubo, que varia de 1,5 a 5 vezes o diâmetro do orifício. Ele tem como função dirigir o jato para uma determinada posição e alterar o coeficiente de vazão de um orifício.

Os bocais podem ser classificados de acordo com sua geometria e dimensões relativas. Podem ser cilíndricos (externos ou internos) ou cônicos (convergentes ou divergentes) e bocais curtos, longos ou padrão.

Ao fazer o cálculo da vazão deve-se levar em consideração alguns coeficientes para correção. Os coeficientes utilizados para correção são o de

contração, de velocidade e de descarga. O coeficiente de contração (C_c) é dado pela razão entre a área da seção contraída e a área do orifício (Equação 1), além disso depende das paredes do reservatório, do tipo de contração e do tipo do orifício, podendo variar entre 0,6 e 0,64. O coeficiente de velocidade (C_v) é dado pela razão entre a velocidade real de saída do fluido - considerando o fluido real e efeito de parede - e velocidade teórica com que o fluido deixa o orifício (Equação 2), em geral varia entre 0,97 e 0,985. O coeficiente de descarga (C_d) é dado pelo produto entre o coeficiente de contração e o de velocidade, depende da forma geométrica, dimensões e valor da carga, o valor médio prático é de 0,61 para orifícios circulares de parede delgada.

$$C_c = \frac{A_c}{A} \quad (6)$$

$$C_v = \frac{v_r}{v_t} \quad (7)$$

- Orifícios afogados de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa.

Neste caso, tem-se que vazão é dada pelo produto entre a área e velocidade, adotando área igual à área do orifício e velocidade igual velocidade real de escoamento obtém-se a Equação 3 para cálculo de vazão de um orifício afogado de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa.

$$Q = C_d A \sqrt{2g(h_0 - h_1)} \quad (8)$$

- Orifícios livres de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa.

Analogamente ao caso anterior, vazão é dada pelo produto entre a área e velocidade, entretanto h_1 é igual à zero, pois o orifício não é afogado. Desse modo, tem-se a Equação 4.

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (9)$$

- Orifícios livres de pequenas dimensões em parede delgada com contração incompleta

Neste tipo de orifício é necessário corrigir o coeficiente de vazão, de um orifício com contração completa, através de equações empíricas. Dessa forma, a vazão é dada pela Equação 5.

$$Q = C'_d A \sqrt{2gh} \quad (10)$$

Onde, para orifícios retangulares, C'_d é dado pela Equação 6.

$$C'_d = C_d (1 + 0,15K) \quad (11)$$

Sendo K a razão entre o perímetro não contraído e o perímetro total.

- Vazão descarregada de bocal

Do ponto de vista prático, o escoamento continua sendo considerado da mesma forma que em orifícios. Com isso, a Equação 4 continua sendo utilizada, entretanto a carga hidráulica é a diferença de nível entre a superfície do reservatório e a linha de centro da seção de saída do tubo, pois o bocal nem sempre estará na horizontal. Assim a carga h passa a ser H , resultando então na Equação 7.

$$Q = C_d A \sqrt{2gH} \quad (12)$$

O C_d do bocal varia de acordo com a Tabela 1.

Tabela 8 - Valores do coeficiente de vazão para bocais.

L/D	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	5,0
C_d	0,60	0,75	0,78	0,79	0,80	0,82	0,79

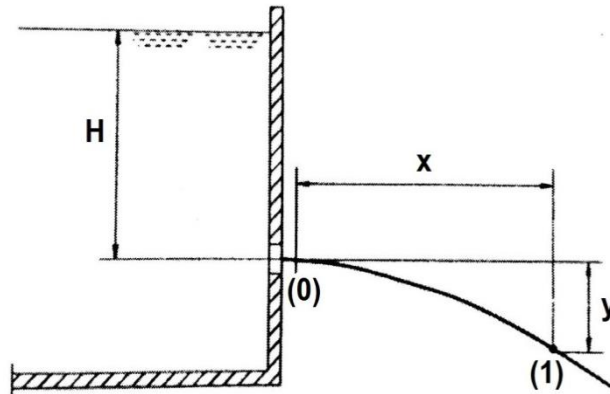
Fonte: Adaptado de SANTOS e MAIA, 2015.

- Determinação da velocidade real, utilizando coordenadas cartesianas

A velocidade real de um jato pode ser medida pelo método das coordenadas. A Figura 1 mostra um reservatório de parede vertical. Devido a

ação da força gravitacional, o jato tem uma trajetória do tipo parabólica. Considerando x e y as coordenadas no ponto (1) da trajetória do jato, pode-se utilizar as equações da cinemática para as direções horizontal e vertical, desprezando-se a resistência do ar.

Figura 14 - Sistema de coordenadas em orifícios



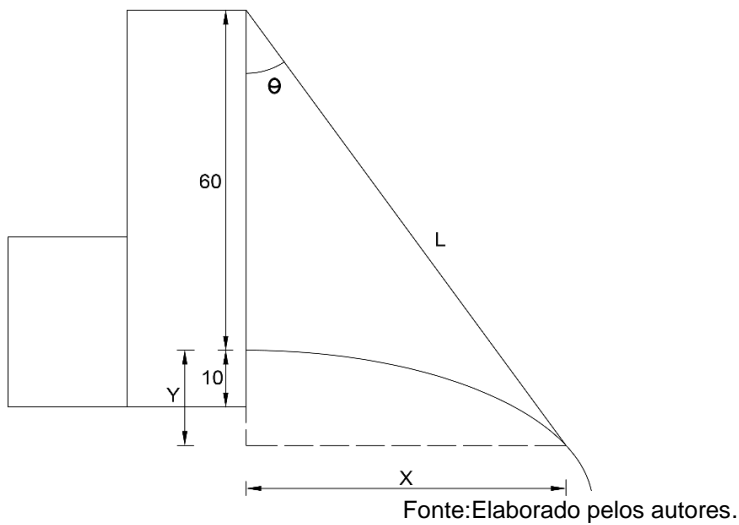
Fonte: PORTO, 2006.

Utilizando este método, a velocidade real do jato pode ser obtida pela Equação 8.

$$V = x \left(\frac{g}{-2y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Os valores de x e y , podem ser calculados a partir do ângulo teta, e do comprimento L do cordão, aplicando-se as fórmulas de seno e cosseno. Vale salientar que o valor de y é igual ao valor do cosseno subtraído de 60, como mostra a Figura 2.

Figura 2– Esquema representativo dos valores de X e Y.



Sabendo-se que C_v é a razão entre a velocidade real e a velocidade teórica, a equação para o C_v é dada por

$$C_v = \frac{x}{2} \left[\frac{1}{-hy} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

- Escoamento sob carga variável

Durante o esvaziamento de um reservatório por meio de um orifício de pequena dimensão, a altura h diminui com o tempo. Com a redução de h , a vazão Q também irá decrescendo. Admitindo o coeficiente de vazão C_d do orifício de área A constantes e um reservatório com área da base igual a S .

Para determinar o tempo de esvaziamento é utilizada a Equação 9.

$$T = \frac{2S}{C_d A \sqrt{2g}} [\sqrt{h_0} - \sqrt{h_1}] \quad (14)$$

1.2 Experimento: bocal e o orifício circular livre de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa

Objetivo

Determinar o coeficiente de descarga de um bocal e de um orifício circular livre, de pequenas dimensões, em parede delgada, com contração completa.

Materiais utilizados

- Béquer;
- Cronômetro;
- Balança;
- Régua graduada.

Procedimento

Coletar a água do jato d'água do orifício utilizando um béquer. Obter a vazão em massa com o auxílio do cronômetro e da balança. Medir a carga hidráulica (h) através da régua graduada. Repetir o experimento para o bocal. Utilizar coeficiente de descarga de 0,61 e 0,82 para orifício e bocal, respectivamente.

Dispositivo	t (s)	m (Kg)	h (m)
Orifício			
Bocal			

Resultados

Dispositivo	$Q_{calculada}$ (m³/s)	$Q_{calculada\ média}$ (m³/s)	Q_{medida} (m³/s)	$Q_{medida\ média}$ (m³/s)
Orifício				
Bocal				

1.3 Experimento: tempo de esvaziamento

Objetivo

Determinar o tempo de esvaziamento do reservatório.

Materiais utilizados

- Cronômetro;
- Régua graduada.

Procedimento

Com o reservatório em um nível constante, medir o nível inicial (h_0). Em seguida, retirar o tampão do orifício circular livre. Após o tempo estipulado, fazer a leitura do nível final (h_1). Repetir o procedimento para o bocal. Utilizar o coeficiente de descarga encontrado no item anterior.

Dispositivo	h_0 (m)	h_1 (m)	$T_{cronometrado}$ (s)	S (m ²)	D (m)
Orifício				0,040804	0,009
Bocal					0,009

Resultados

Dispositivo	$T_{cronometrado}$ (s)	$T_{calculado}$ (s)
Orifício		
Bocal		

1.4 Experimento: velocidade real e coeficiente de velocidade para orifício livre

Objetivo

Determinação da velocidade real e do coeficiente de velocidade utilizando coordenadas cartesianas.

Materiais utilizados

- Transferidor;
- Cordão;
- Régua graduada.

Procedimento

Medir o nível d'água contanstante no reservatório. Em seguida, deve-se segurar uma ponta do cordão junto à borda do reservatório R1, próximo ao transferidor. Com a outra ponta do cordão, deve-se interceptar o jato de água e então medir o ângulo teta e o tamanho L do cordão. Repetir o procedimento 3 vezes.

θ (°)	L (cm)	h (m)

Resultados

X (m)	Y (m)	v (m/s)	$v_{média}$ (m/s)	C_v	C_v médio

1.5 Experimento: orifício retangular livre de pequenas dimensões em parede delgada com contração incompleta

Objetivo

Determinar o coeficiente de descarga para o orifício retangular livre de pequenas dimensões em parede delgada com contração incompleta.

Materiais utilizados

- Béquer;
- Cronômetro;
- Balança;

- Régua graduada.

Procedimento

Coletar a água do orifício por meio de um béquer. Obter a vazão em massa com o auxílio do cronômetro e da balança. Medir a carga hidráulica (h) através da régua graduada. O orifício retangular tem 3,34 cm de base e 1,1 cm de altura.

h (m)	m (Kg)	t (s)	Q (m ³ /s)

Resultados

C'_d	C_d	C_d médio

1.6 Experimento: orifício circular afogado de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa

Objetivo

Determinar o coeficiente de descarga para orifício circular afogado de pequenas dimensões em parede delgada com contração completa.

Materiais utilizados

- Béquer;
- Cronômetro;
- Balança;
- Régua graduada.

Procedimento

Coletar com o béquer a água que sai pelo ladrão. Obter a vazão em massa com o auxílio do cronômetro e da balança. Medir a carga hidráulica h_0 e h_1 .

h_0 (m)	h_1 (m)	m (Kg)	t (s)

Resultados

Q (m ³ /s)	C_d	C_d médio