

Roteiro - Aula Prática - Orifícios e Bocais:

1. **Objetivo do experimento:** Estudo de escoamento em orifícios e bocais, e demonstração das características destes dispositivos. Medição de velocidade e vazão. Estimativas de coeficientes de contração, velocidade e descarga.

2. Revisão Teórica

Os orifícios e bocais são acessórios acoplados a um reservatório, geralmente com o objetivo de conectá-los a uma tubulação, como mangueiras ou a própria rede de drenagem.

a. Coeficientes característicos dos acessórios

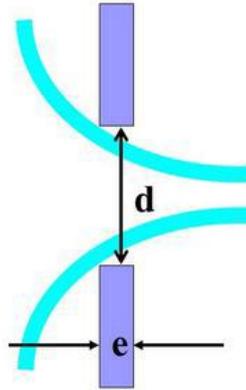
Sendo acessórios acoplados a uma tubulação hidráulica, estes são responsáveis por uma perda energética quando o líquido escoar através deles. Essa defasagem influencia no alcance do jato, na área total do mesmo, bem como na vazão final.

A queda de energia cinética é caracterizada por um coeficiente conhecido como coeficiente de velocidade (C_v). Esse valor representa a razão entre a velocidade do líquido após cruzar o acessório e a velocidade que teria se não houvesse essa defasagem de energia. É uma característica intrínseca ao utensílio.

Por definição é calculado pela fórmula:

$$C_v = \frac{V_r}{V_t}$$

Outro coeficiente importante se refere ao grau de contração do jato de água. Quando o escoamento passa por um orifício, ele sofre uma diminuição da área pois não há uma mudança brusca na direção da velocidade e sim uma gradual. Esse coeficiente de contração (C_c) representa a razão entre a área contraída do jato e a área do orifício.



Pode ser calculado pela fórmula:

$$C_c = \frac{A_c}{A_o}$$

Resumindo a união desses dois coeficientes, há o coeficiente de descarga, que mostra a perda de vazão do líquido do escoamento. Dessa forma, o C_d representa a razão entre a vazão real e a idealizada, caso não houvesse perda energética, nem contração no orifício.

Pode ser calculado por:

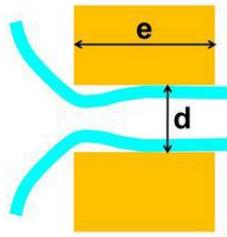
$$C_d = \frac{Q_r}{Q_t} = \frac{V_r * A_c}{V_t * A_o} = C_v * C_c$$

b. Orifícios

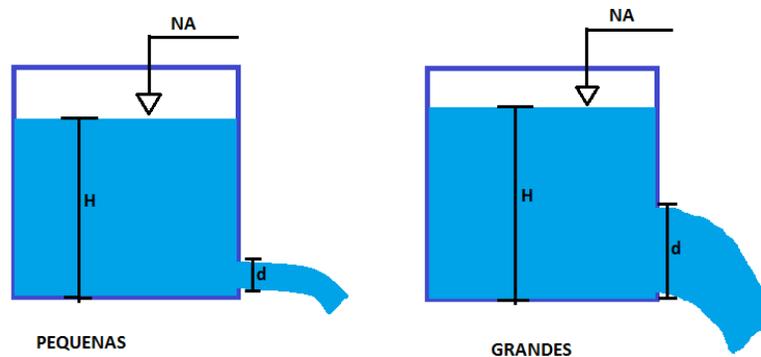
Um orifício pode ser definido simplesmente como uma abertura em um reservatório. Essa abertura deve ter características geométricas bem definidas, como uma forma padrão e um perímetro fechado. Além disso, só terá validade se estiver abaixo do nível d'água, permitindo o escoamento.

Os orifícios podem ser classificados de três maneiras:

- *Quanto à forma da abertura:* a forma do orifício influencia no escoamento e na perda energética. As mais comuns são as retangulares e as circulares
- *Quanto à espessura da parede:* A espessura da parede é fundamental na determinação dos coeficientes, principalmente no de contração. Pode ser de dois tipos
 - *Parede Espessa:* Um orifício pode ser considerado de parede espessa quando a mesma tem espessura superior ao raio de abertura do orifício. Isso permite que a veia líquida toque a parede do orifício após uma contração inicial, diminuindo a perda de área.



- *Parede Delgada*: Um orifício pode ser considerado de parede delgada, quando a espessura da parede é inferior ao raio de abertura do orifício.
- *Quanto às dimensões*: As dimensões dos orifícios são importantes na determinação dos cálculos.
 - *Grandes*: Possuem diâmetro de abertura superior a um terço da carga hidráulica, isto é, da altura do nível de água no reservatório. Como tem uma grande abertura, há diferença de pressão significativa em cima e baixo do orifício, não permitindo simplificação nos cálculos, nem aproximação.
 - *Pequenos*: Possuem diâmetro de abertura inferior a um terço da carga hidráulica. Podem ser considerados praticamente como um ponto, não tendo diferenças significativas na pressão, permitindo aproximações.



c. Bocais

Os bocais são estruturas adaptadas aos orifícios com a função de direcionar o jato de água após a saída do reservatório. Um acessório é considerado um bocal quando a razão o comprimento e o diâmetro for inferior a 5 e superior a 1,5.

Para efeito de cálculos, as equações dos bocais referentes ao cálculo da vazão pode ser generalizada para a mesma dos orifícios pequenos. Além disso, os bocais são uma extensão dos orifícios de parede espessa.

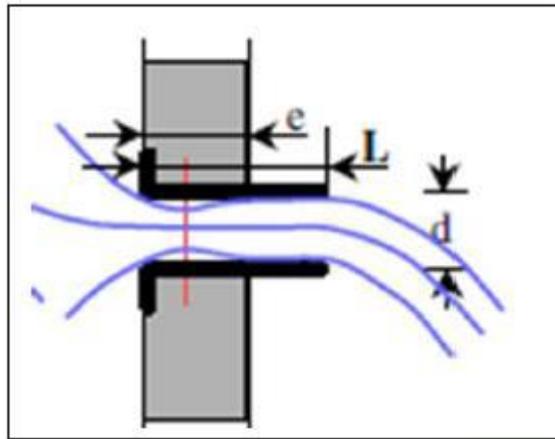
d. Comparação entre orifícios e bocais

Analisando os valores encontrados na literatura, é possível fazer uma comparação genérica entre os coeficientes dos dois acessórios:

Coeficiente	Bocal	Orifício delgado
C_c	1,00	0,62
C_v	0,82	0,98
C_d	0,82	0,61

É possível ver que o coeficiente de velocidade é menor no bocal do que no orifício. Isso se deve à existência de uma alteração brusca na direção do escoamento quando o mesmo se insere no bocal, tendo maior variação do módulo da velocidade. Tal fato não ocorre no orifício, quando esta mudança é mais sutil.

Quanto à contração, não há perdas com relação ao bocal, se ele for cilíndrico. Isso ocorre porque, mesmo após uma contração inicial, o fluido se adere novamente à superfície durante o escoamento, como se pode ver na figura abaixo:



Sendo assim, fazendo o produto entre os coeficientes de contração e velocidade, observa-se que o bocal apresenta um coeficiente de descarga mais elevado, com uma vazão 34% superior a dos orifícios.

3. Equipamentos, materiais e procedimento experimental

O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 1, e é composto por:

- Uma cuba de lançamento e retorno (CLR);
- Uma bomba centrífuga (BC);
- Um painel elétrico (PE);
- Uma régua cartesiana com sensor óptico (SO);
- Um tanque de descarga (TD);
- Acessórios, conforme especificado na Tabela 1 e
- Válvulas: VR1, VR2, VB1, VB2 e VB3.

Tabela 1. Características dos acessórios hidráulicos

Abreviação	Características do acessório		Diâmetro [mm]	
Or-01	Orifício	parede delgada	L = 5 mm	15
Or-02		parede espessa	L = 10 mm	
Bc-01	Bocal	externo normal	L = 50 mm	10
Bc-02		interno normal	L = 50 mm	
Bc-03		externo normal	L = 75 mm	15
Bc-04		interno normal	L = 75 mm	
Bc-05		externo com entrada suave	L = 75 mm	
Bc-06		externo divergente ($\alpha=13^\circ$)	L = 75 mm	
Bc-07		externo divergente ($\alpha=5^\circ$)	L = 135 mm	
Bc-08		externo convergente ($\alpha=13^\circ$)	L = 75 mm	
Tc-01	Tubo curto	L = 100 mm		5,5
Tc-02		L = 400 mm		
Tc-03		L = 700 mm		
Tc-04		L = 100 mm		10,5
Tc-05		L = 400 mm		
Tc-06		L = 700 mm		
Tc-07		L = 100 mm		21,2
Tc-08		L = 400 mm		
Tc-09		L = 700 mm		

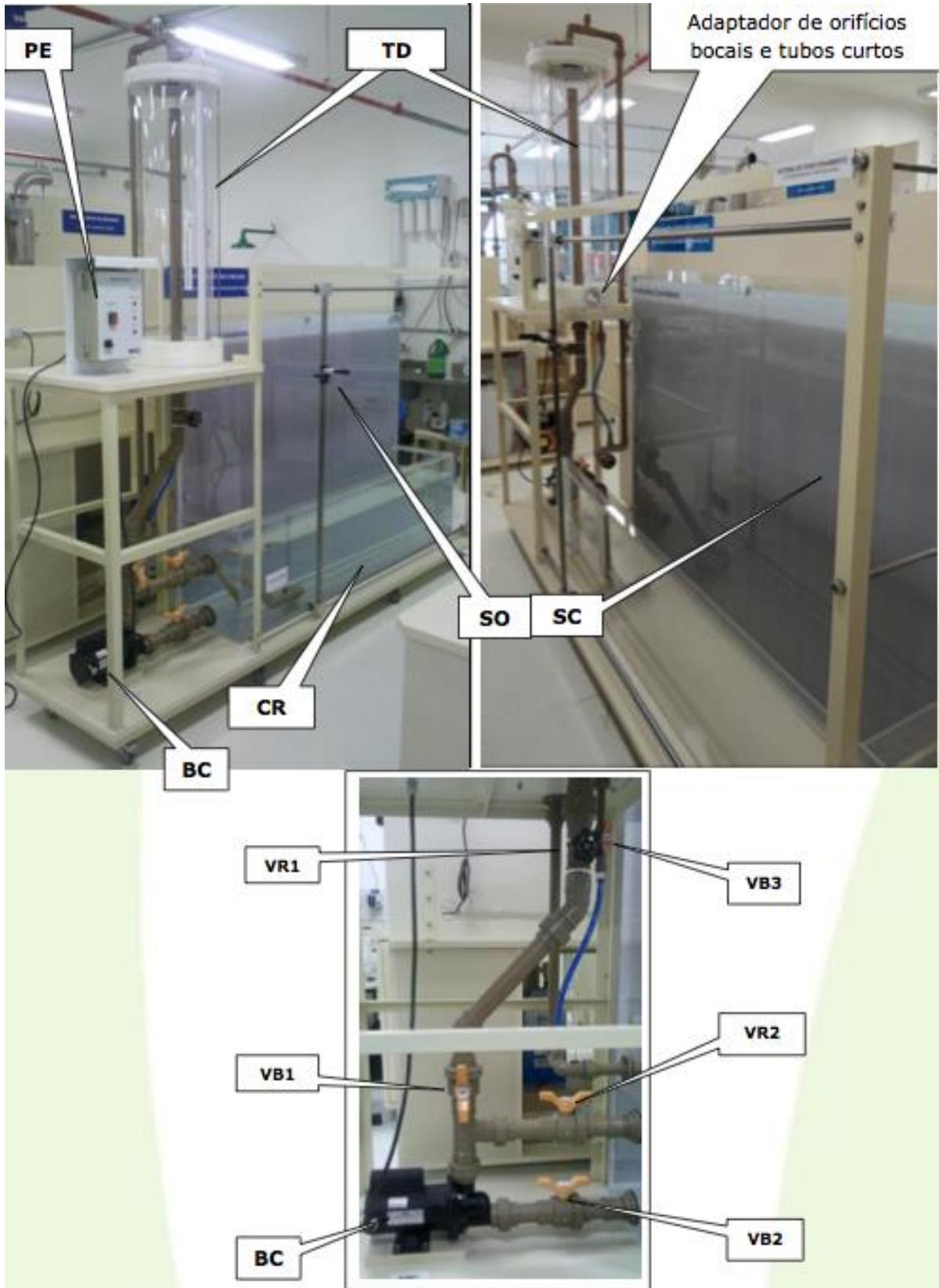


Figura 1. Equipamento utilizado no experimento de orifícios, bocais e tubos curtos.

O procedimento experimental envolve a determinação das vazões e velocidades de saída da água para cada acessório adotado, em três níveis d'água distintos. Para isso, são realizados os procedimentos:

- a. Anexar o acessório a ser analisado ao tanque de descarga;
- b. Ligar a bomba e esperar que o nível d'água estabilize – **anotar o nível d'água**;
- c. Realizar 3 medições de volume, cronometradas – **anotar volumes e tempos**;
- d. Medir, com o auxílio da régua cartesiana e do sensor óptico, o alcance do esguicho – **anotar o valor de X** (o valor de Y será constante para todas as leituras e fornecido pelo monitor);
- e. Aumentar a vazão e repetir os itens (b) a (d);
- f. Aumentar uma vez mais a vazão e repetir os itens (b) a (d);
- g. Trocar o acessório e repetir o procedimento – itens (b) a (f).

4. Resultados e discussões

Nessa etapa, faça uma (ou mais) tabela (s) contendo os seguintes resultados:

- 1) Ramo 1
 - a) Velocidade teórica (V_t) para cada nível (H) em cada um dos acessórios
 - b) Velocidade real (V_r) para cada nível (H) em cada um dos acessórios
 - c) Coeficiente de Velocidade (C_v) para cada nível (H) em cada um dos acessórios
 - d) O Coeficiente de Velocidade médio para cada acessório
- 2) Ramo 2
 - a) Vazão teórica (Q_t) para cada nível (H) em cada um dos acessórios.
 - b) Vazão real (Q_r) para cada nível (H) em cada um dos acessórios
 - c) O Coeficiente de Descarga (C_d) para cada nível (H) em cada um dos acessórios
 - d) O Coeficiente de Descarga médio para cada acessório
- 3) Ramo 3
 - a) O Coeficiente de Contração (C_c) para cada nível (H) em cada um dos acessórios
 - b) O Coeficiente de Contração médio para cada acessório

Elabore também o(s) seguinte(s) gráfico(s):

- 1) Ramo 1
 - a) Cinco gráficos para reformular a trajetória de cada esguicho (Gráfico y (cm) por x (cm)). São eles:
 - i) As trajetórias de todos os níveis do acessório 1
 - ii) As trajetórias de todos os níveis do acessório 2
 - iii) As trajetórias para o primeiro nível d'água dos acessórios 1 e 2
 - iv) As trajetórias para o segundo nível d'água dos acessórios 1 e 2
 - v) As trajetórias para o terceiro nível d'água dos acessórios 1 e 2

Com base nos resultados, medições e teorias aprendidas em Sala de Aula e no Laboratório de Hidráulica, **responda as questões do Questionário em anexo.**

5. Metodologia

a. Ramo 1: Determinação do Coeficiente de Velocidade

Para a determinação do coeficiente de velocidade, será usado o método das coordenadas, com a aplicação da tubulação e medindo-se a coordenada de um ponto para obter a velocidade real, isto é, após atravessar o acessório.

A velocidade teórica poderá ser calculada pela equação de energia:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\gamma} + Z_s + \Delta H$$

Onde: V_1 = velocidade do topo do reservatório (m/s); V_s = velocidade da saída (m/s); p_1 = pressão do topo (N/m^2); p_s = pressão da saída (N/m^2); γ = peso específico do líquido do escoamento (N/m^3); ΔH = perda de carga (m); Z_1 = cota altimétrica do topo (m); Z_s = cota altimétrica da saída (m) e g = aceleração da gravidade = 9,81 m/s.

Como a velocidade no topo pode ser considerada ínfima, devido à grande área, ela pode ser desconsiderada neste cálculo, bem como a perda de carga na extensão do reservatório. As pressões, por serem iguais à atmosférica, serão anuladas. Sendo assim, restaria apenas:

$$Z_1 = \frac{V_s^2}{2g}$$

Como este é um modelo ideal (sem perda de carga no bocal), a velocidade em questão é a velocidade teórica. Isso significa que, se não houvesse defasagem energética no acessório, toda a carga de energia potencial seria convertida em carga cinética. Assim, pode-se reescrever as equações, de forma a obter essa velocidade:

$$Z_1 = \frac{V_t^2}{2g}$$

$$V_t = \sqrt{2gZ_1}$$

Para a determinação da velocidade real, como já foi citado, será utilizado o método das coordenadas, utilizando-se dos princípios básicos da cinemática, considerando os tipos de movimento na direção horizontal e vertical.

Em y , na vertical, há apenas a aceleração da gravidade, portanto o movimento em questão é retilíneo e uniformemente variado, sendo descrito pela seguinte equação horária:

$$y = y_0 + v_{0y}t + 0,5a_yt^2$$

Onde: y é uma coordenada qualquer (m) da vertical, y_0 é a posição vertical inicial (m), v_{0y} é a velocidade inicial em y (m/s), a_y é a aceleração em y (m/s²) e t é o tempo o qual o escoamento passou pela coordenada x (s).

Como o escoamento começa no eixo (0,0), a coordenada inicial de y é igual a zero. Considerando o lançamento inicial perfeitamente horizontal, a velocidade vertical inicial também é nula. A aceleração em questão pode ser considerada a gravidade, sendo positiva, pois o eixo cresce positivamente para baixo.

Sendo assim, a equação reduzida resultaria em:

$$y = 0,5gt^2$$

Isolando-se o t , tem-se:

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

Em x , na horizontal, não há nenhuma aceleração presente, portanto o movimento em questão é retilíneo e uniforme, sendo descrito pela seguinte equação horária:

$$x = x_0 + v_x t$$

Onde: x é uma coordenada qualquer (m), x_0 é a posição inicial (m), v_x é a velocidade em x (m/s) e t é o tempo o qual o escoamento passou pela coordenada x (s).

No caso estudado, a posição inicial horizontal será igual a zero, e a velocidade será a velocidade real do escoamento. Dessa maneira, pode se adaptar a equação:

$$x = V_r t$$

Substituindo o tempo encontrado pela análise na vertical, é possível encontrar a seguinte relação para a horizontal:

$$x = V_r \sqrt{\frac{2y}{g}}$$

Isolando a velocidade, pode-se chegar a:

$$V_r = x \sqrt{\frac{g}{2y}}$$

Dessa maneira, tendo a velocidade real e a teórica, pode se chegar ao coeficiente de velocidade:

$$C_v = \frac{V_r}{V_t} = \frac{x \sqrt{\frac{g}{2y}}}{\sqrt{2gZ_1}}$$

$$C_v = \frac{x}{2\sqrt{Z_1} y}$$

Para o experimento, esse valor de C_v será calculado para acessórios diferentes, utilizando alturas distintas para cada.

Comparando os escoamentos para alturas próximas, só que de materiais diferentes, será possível observar o alcance de cada escoamento, de acordo com cada C_v .

Para isso, é necessário criar uma função trajetória de y em função de x , isolando o y na equação anterior:

$$y = \frac{1}{Z_1} * \left(\frac{x}{2C_v} \right)^2$$

Dessa maneira, considerando o C_v e o Z_1 constantes para cada escoamento, é possível elaborar o gráfico da trajetória, atribuindo valores de x . Observando o gráfico para cada orifício em cada altura, é possível verificar em qual o alcance foi maior.

b. Ramo 2: Determinação do Coeficiente de Descarga

Para a determinação do coeficiente de descarga, será utilizado o conceito de vazão como um fluxo de um volume em um determinado tempo. Isso permitirá calcular experimentalmente a vazão real.

A vazão teórica será calculada a partir da velocidade teórica, obtida no ramo 1. Ela pode ser definida pela fórmula:

$$Q_t = A_o V_t$$

Onde: Q_t é a vazão teórica (m^3/s); A_o é a área do orifício (m^2) e V_t é a velocidade teórica (m/s).

Já a vazão real será calculada experimentalmente, como já foi dito, utilizando a definição básica, como a relação do volume pelo tempo:

$$Q = \frac{Vol}{t}$$

Onde Q é a vazão, Vol é o volume e t é o tempo.

O experimento consistirá em encher uma proveta com certo volume e marcar o tempo decorrido. Para minimizar erros, o procedimento será realizado três vezes, obtendo-se a vazão real por uma média aritmética simples.

$$Q_r = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{1}{3} \left(\frac{Vol_1}{t_1} + \frac{Vol_2}{t_2} + \frac{Vol_3}{t_3} \right)$$

Onde Q_r é a vazão real (mL/s), Q_i é a vazão de cada procedimento (mL/s), Vol_i é o volume de cada procedimento (mL) e t_i é o tempo para preencher o respectivo volume (s).

Tendo a vazão real e a teórica, é possível obter o coeficiente de descarga pela equação:

$$C_d = \frac{Q_r}{Q_t}$$

Para isso, é necessária a conversão da vazão teórica para mL/s ou da real para m^3/s .

c. Ramo 3: Determinação do Coeficiente de Contração

Tendo o coeficiente de descarga e de velocidade, é possível chegar ao de contração, utilizando a relação básica:

$$C_d = C_v * C_c$$

$$C_c = \frac{C_d}{C_v}$$

Bibliografia:

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. Manual de Hidráulica. 8a ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1998.

ECOEDUCACIONAL. Roteiros de aulas práticas. 2012.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. 4^{ed} São Carlos: EESC-USP, 2006. 540p.