

METODOLOGIA PARA ESTUDO EXPERIMENTAL DE JATOS DE ORIFÍCIOS

Vitor Souza Silva¹
Jorge Luis Zegarra Tarqui²

Resumo O presente trabalho propõe uma metodologia de estudo de jatos de orifícios, mediante a utilização das técnicas fotográficas de iluminação para a visualização dos fenômenos hidrodinâmicos. Para isso, desenvolveu-se um projeto do equipamento para visualização de jatos de orifícios, permitindo a visualização e a medição físicas do fenômeno. No dimensionamento, usou-se da formulação de Bernoulli ajustada para fluidos reais, considerando os coeficientes de velocidade, para diferentes diâmetros e formas de orifícios com diferentes cargas ou níveis de água. A trajetória do jato será medida em um sistema de referência, nos eixos x e y , em um papel milimetrado. Paralelamente, o artigo descreve a aplicação das diferentes técnicas de iluminação fotográficas para a visualização de fluidos, assim como o processo de captura de imagens, por uma câmara filmadora digital, e a transferência ao computador, a fim de realizar a análise das imagens mediante software de tratamento de imagens, que permitam estabelecer as características físicas do jato, como grau de contração, descrição da trajetória, e outras. E comparar com as medidas diretas observadas na literatura de hidráulica.

Palavras-chave: Fluidos; Visualização; Jato

INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa desenvolver um módulo de laboratório para o estudo do jato de orifícios, no contexto de ensino, pesquisa e extensão, nas disciplinas de Fenômenos de Transporte e Hidráulica Aplicada, presentes na graduação do curso de Engenharia Civil da Universidade Católica do Salvador (UCSAL).

No percurso do trabalho foram definidas as seguintes etapas: A apresentação das equações teórico-empíricas da hidráulica a partir do referencial teórico; o emprego das equações teórico-empíricas que permitiram o dimensionamento do equipamento; a definição do aspecto construtivo do mesmo; e uma metodologia para estudo dos fenômenos do Jato mediante as técnicas fotográficas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Definição de Orifícios

Os Orifícios são furos de perímetro fechado projetados na parede dos reservatórios, tanques, canais e canalizações, e são também empregados em projetos de irrigação, barragens e etc. Ficam abaixo da superfície livre da água, e possuem a finalidade de medir e controlar vazões, podendo apresentar formas geométricas: quadradas, circulares, retangulares, elípticas, triangulares etc.

¹ Aluno voluntário da iniciação científica do Curso de Engenharia Civil da Universidade Católica do Salvador – UCSal. E-mail: vitorsouza22@bol.com.br.

² Doutor, Professor do Curso de Engenharia da UCSal. E-mail: jlztarqui@yahoo.com.br.

Classificação dos Orifícios

Define-se como carga hidráulica (H) a altura de água medida a partir do eixo do orifício de altura d , ver figura 1.

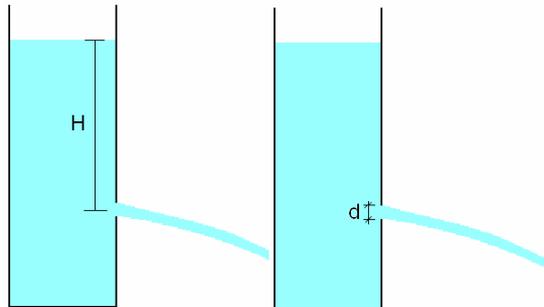


Figura 1 - Representação da carga hidráulica e altura do Orifício.

a) Quanto as suas dimensões, os orifícios podem ser classificados segundo Porto (2004.) como:

Pequeno: quando suas dimensões forem muito menores que a carga hidráulica H em que se encontra. $d \leq H/3$.

Grande: $d > H/3$, sendo d a altura do orifício.

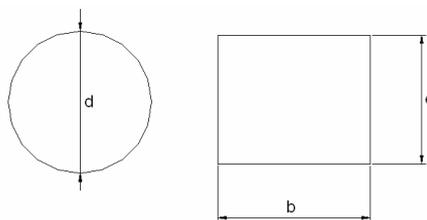


Figura 2 – Exemplifica alturas de um orifício circular e retangular.

b) Quanto à espessura da parede dos orifícios, eles podem ser classificados como:

b.1) Parede Delgada

Quando a espessura (e) corresponde a valores menores que a metade da dimensão da altura do orifício(d).

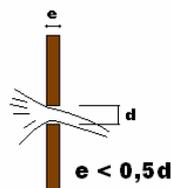


Figura 3 - Orifício de Parede Delgada

b.2) Parede Espessa

Quando a espessura (e) corresponde a valores entre a metade e uma vez e meia da dimensão da altura do orifício (d). $0,5d < e < 1,5d$.

Aplicação do Teorema de Bernoulli para Orifícios (Cálculo da Velocidade Teórica)

O jato é formado a partir da energia potencial hidráulica transformada em energia cinética, desconsiderando as perdas energéticas existentes e aplicando-se o teorema de Bernoulli, pode ser deduzida a velocidade teórica do jato. Baseado na linha de fluxo, ver figura 5, passando nos pontos *a* e *b* no interior do reservatório, se for admitido o referencial de nível (RN) passando no ponto *b*, as pressões dos dois pontos iguais à pressão atmosférica no referencial efetivo, conclui-se que a cota no ponto *a* corresponde à própria carga hidráulica. Desprezando a velocidade no interior do reservatório, chega à seguinte dedução, ver Eq (1).

<i>H</i>	Carga hidráulica (m)
<i>A</i>	Área do reservatório (m ²)
<i>P_a</i>	Pressão no ponto a (m)
<i>A_c</i>	Área contraída do Jato (m ²)
<i>P_b</i>	Pressão no ponto b (m)
<i>RN</i>	Referencial de Nível (m)
<i>V_o</i>	Velocidade no interior do reservatório (m/s)
<i>V_t</i>	Velocidade Teórica (m/s)

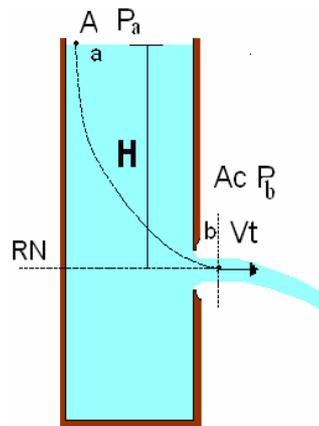


Figura 5 - Linha de Fluxo no interior do Reservatório.

Aplicando a equação teórica de Bernoulli referente à figura 1.4:

$$Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \alpha \frac{V_o^2}{2g} = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} + \Delta H \quad (1)$$

<i>Z_a</i>	Energia de Posição no Ponto a (m)
<i>Z_b</i>	Energia de Posição no Ponto b (m)
<i>P_a/γ</i>	Energia de Pressão no ponto a (m.c.a)
$\alpha V_o^2/2g$	Energia Cinética no ponto a (m.c.a)
$\alpha V^2/2g$	Energia Cinética no ponto b (m.c.a)

$$V_t = \sqrt{2gH} \quad (2)$$

A velocidade teórica (V_t) equivale à velocidade do jato desprezando as perdas energéticas, ver Equação (2).

Determinação Experimental da Velocidade Real

A velocidade do jato é diretamente proporcional à carga hidráulica, ver Eq. (2), mas o seu valor não condiz com o verdadeiro comportamento do jato. A velocidade pode ser determinada de maneira experimental da seguinte forma:

Colocando eixos coordenados para identificar a trajetória parabólica do jato causada pela ação gravitacional. Observa-se o deslocamento da partícula da posição 0 até 1 em movimento uniforme (MU) na horizontal, $x = v \Delta t$ Equação (3), e em movimento uniforme variado (MUV) na vertical, $y = g (\Delta t^2/2)$ Equação (4). Com base nas equações da cinemática e na visualização da Figura 6, chega à seguinte formulação deduzida por Pimenta (1981.).

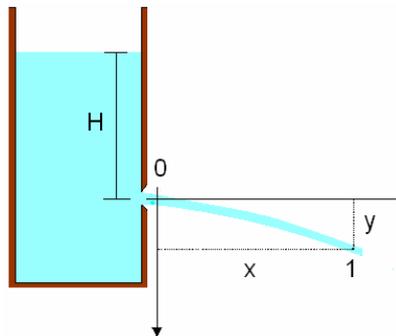


Figura. 6 - Carga Hidráulica e projeções x e y do jato.

Isolando o Δt da Equação (4) e substituindo na Equação (3) permiti chegar à equação da Velocidade Real do jato, ver Equação (5).

$$V = x \sqrt{\frac{g}{2y}} \quad (5)$$

Determinação do Coeficiente de Velocidade (C_v)

O coeficiente de velocidade é um parâmetro que relaciona a velocidade real com a velocidade teórica, segundo resultados experimentais encontrados por Neves (1989) e Pimenta (1981.), para orifícios circulares de parede delgada, C_v possui valores médios de 0,98. Substituindo as velocidades das Equações (2) e (5) na Equação (6) chega à seguinte conclusão, podendo ser representada como visto abaixo na Equação (7)

$$C_v = \frac{V}{V_t} = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{1}{H \cdot y}} \quad (6)$$

$$H = \frac{x^2}{4y C_v^2} \quad (7)$$

Determinação do Coeficiente de Contração (Cc)

Define-se como Coeficiente de Contração (Cc) a relação entre Ac (Área contraída do Jato) e Ao (Área do Orifício). O valor Cc corresponde a 0,62, segundo Neves (1989) e Pimenta (1981).

$$C_c = \frac{A_c}{A_o} \quad (8)$$

Efeito ao desprezar a velocidade no interior do reservatório

$$V_t = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_c}{A_o}\right)^2}} \cdot \sqrt{2g \cdot H} \quad (10)$$

A Equação (10) demonstra o efeito que causa na Velocidade Teórica (Vt) se for desprezada a velocidade no interior do reservatório (Vo), deduzida por Pimenta (1981). O coeficiente encontrado na Equação (10), depende diretamente da relação entre a área contraída (Ao) e a área do reservatório (A), sendo a relação das áreas igual a 0,1, seu quadrado será igual a 0,01 e o valor do coeficiente será:

$$V_t = 1,005 \cdot \sqrt{2g \cdot H} \quad (11)$$

Devendo, então, ter a seção do reservatório valores $A \geq 10 A_c$ para cometer no cálculo da Vt, ao desprezar a Vo, um erro igual a 0,5%.

Determinação da perda de carga

A diferença do valor da energia cinética ($vt^2 / 2 g - v^2 / 2 g$) da velocidade teórica (Vt) com a velocidade real (V) representa a perda de carga existente no orifício, que pode ser calculada da seguinte maneira, deduzida por Pimenta (1981.).

$$\frac{\Delta H}{H} = (1 - C_v^2) \quad (12)$$

Coeficiente de Descarga (Cd)

O coeficiente de descarga é a relação da vazão real (Q) com a vazão teórica (Qt). A vazão real é o volume do jato medido no intervalo de tempo, enquanto a vazão teórica é o produto da Velocidade teórica com a seção do jato. Essa relação chega à Equação (13), em que o cálculo de Cd será o produto de Cv, encontrado experimentalmente, ver Equação (6), e o Cc encontrado a partir das técnicas fotográficas.

$$C_d = \frac{Q}{Q_t} \quad (13)$$

$$C_d = C_c \cdot C_v \quad (14)$$

O valor da vazão real (Q) é encontrado somente sabendo a área do orifício e a carga hidráulica, pois os fenômenos do jato estão sendo considerados no próprio C_d , ver Eq. (12).

$$Q = C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2gH} \quad (15)$$

TÉCNICAS DE ILUMINAÇÃO

No relatório técnico de Daum e Harding (1992), eles apresentam uma série de técnicas de iluminação, entre as quais pode-se citar as seguintes:

Iluminação Oblíqua

A luz incide de maneira co-linear a linha de foco, ver Figura 9, quando se utiliza um fundo preto para criar contraste. O objeto apresenta-se de cor clara.

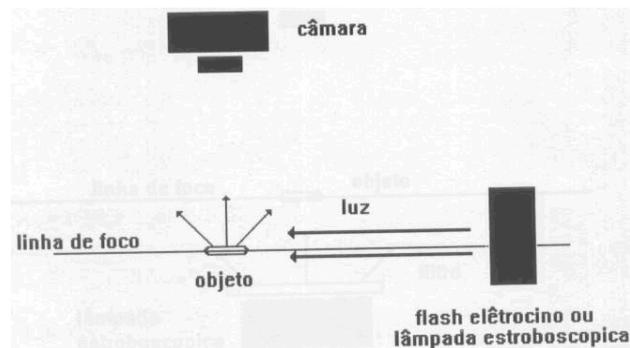


Figura 9 – Iluminação Oblíqua.

Iluminação de Fundo “Back Lighting”

Esta técnica consiste em fazer incidir a luz do flash ou lâmpada estroboscópica de maneira direta à câmara, mas com a fonte de luz atrás do objeto. Deste modo o objeto apresenta-se escuro e fundo branco.

Na sua variante “back lighting” difusa incide-se a luz de forma direta, ver Figura 10, fazendo-se uso de um filtro para diminuir a intensidade da luz. Também se fecha o diafragma de modo a regular o ingresso de luz. Esta técnica permite obter alto contraste da silhueta do objeto de estudo, mas ter-se-á limitações em visualizar sua superfície.

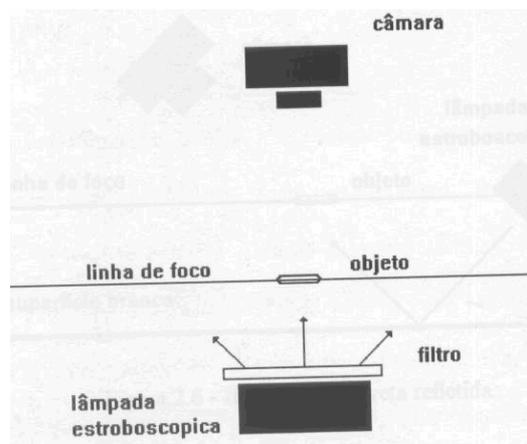


Figura 10 – Iluminação de fundo difusa ou “back lighting” difusa.

Iluminação Indireta Refletida

Apresenta duas Variantes:

a) incidir de forma indireta, ver Figura 11, e se utiliza uma superfície branca na qual se incide a luz e é direcionada para câmara. Esta técnica apresenta uma vantagem que permite visualizar a superfície do objeto, mas com a desvantagem de promover um baixo contraste, e em consequência se precisa de uma alta intensidade.

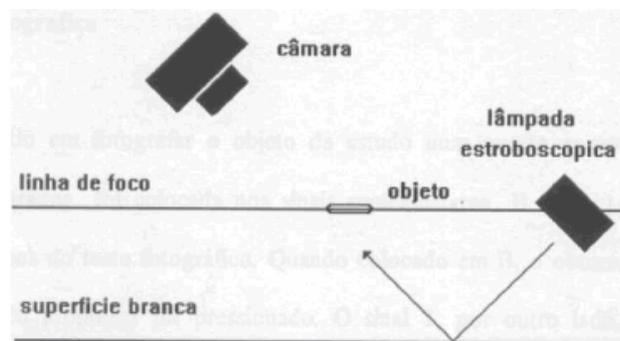


Figura 11 – Iluminação indireta refletida.

b) incidir de maneira indireta com dupla iluminação, emprega-se a técnica mencionada no parágrafo superior, mas com a variante do uso de dois flashes sincronizados por meio de células fotoelétricas, ver Figura 12.

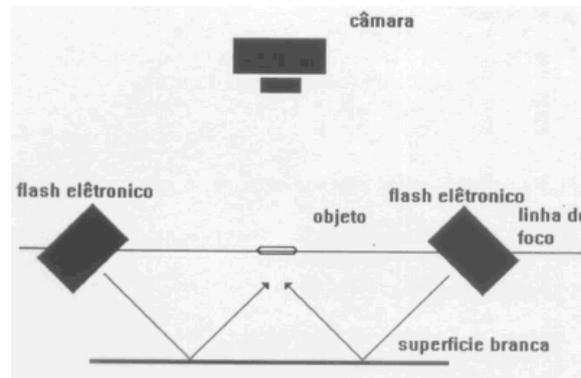


Figura 12 – Dupla iluminação indireta refletida

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E RESULTADOS

Determinação da Altura do Reservatório

Torna-se necessário projetar um reservatório que permita a flexibilidade de cargas hidráulicas para formação de diversos alcances de jatos. Pondo valores desejados do alcance do jato na direção x , com valor fixo na direção y igual a 0,15 m, pois é valor máximo desejado de captura da trajetória na direção y e pelos bastões, resulta, a partir da Equação (7), valores da carga hidráulica necessária para formação dos jatos para $C_v = 0,98$.

$x(m)$	$y(m)$	$H(m)$
0,1	0,15	0,02
0,2	0,15	0,07
0,3	0,15	0,16
0,4	0,15	0,28
0,5	0,15	0,43
0,6	0,15	0,62
0,7	0,15	0,85

Tabela 1.0 – Escolha da Carga Hidráulica Máxima

Com base na Tabela 1.0 construída no programa Microsoft Office Excel, os valores selecionados do alcance do jato, $x = 0,60$ m, $y = 0,15$ m e $H=0,62$ m, permitiram o dimensionamento inicial do experimento, a partir dos mesmos, optou-se pela escolha de oito bastões espaçados a 0,08 m, com 0,005 m de diâmetro, para medir a trajetória do jato, e a escolha da altura reservatório 0,923 m, para permitir a variação de cargas de 0,70 m até 0,10 m., ver Figura 13.

As dimensões escolhidas foram as seguintes: A seção do reservatório igual a 0,12 m x 0,12 m com $A = 0,0144$ m², baseado na Equação (10), para escolha do maior diâmetro dos orifícios de 0,006 m e sua respectiva área com $A_o = 0,0000283$ m², a sua área contraída igual a $A_c = 0,0000175$ m, para $C_c = 0,62$, admitindo a condição da Equação (10), a relação $A_c/A = 0,0012153$ e erro na velocidade teórica de 0,0000738%, desprezível; Admitindo a condição de pequenos orifícios $d \leq H/3$, sendo a menor carga hidráulica desejada $H = 0,10$ m, em que, $H/3 = 0,033$ m < $d = 0,006$ m, atendendo à condição; e para orifícios de parede delgada com espessura $e = 0,003$ m, para condição de $e < 0,5d$.

Determinação da Perda de Carga (Δh) e Cálculo da vazão(Q) e Escolha do diâmetro do Orifício (d)

H(m)	Δh (m)	Q(m ³ /s)
0,1	0,00396	0,000024
0,2	0,00792	0,000034
0,3	0,00119	0,000042
0,4	0,00158	0,000048
0,5	0,00198	0,000054
0,6	0,00238	0,000059
0,7	0,00277	0,000064

Tabela 2 – Cálculo da Vazão e perda de Carga prevista para o orifício de 0,006 m de diâmetro.

Os cálculos referentes à tabela 2, foram encontrados a partir das Equações 12 e 15, onde mostra o cálculo da perda de carga e da vazão para diversas cargas hidráulicas em um dos orifícios de 0,003 a 0,006 m de diâmetro e área 0,0000283. Para $C_c = 0,62$, $C_v = 0,98$ e $C_d = 0,61$.

Técnicas Fotográficas

Pretende-se testar as técnicas de iluminação e selecionar a mais adequada. As imagens serão capturadas com o uso de uma Câmera Filmadora Digital e tratadas mediante um software livre; será então, possível estudar certos parâmetros de caracterização do fenômeno do jato de orifícios, entre eles: A contração do jato, trajetória e processo de expansão do jato no fim da trajetória.

Os resultados esperados das técnicas fotográficas pretendem ser similares aos obtidos por Tarqui (1996), ver Figuras 13.

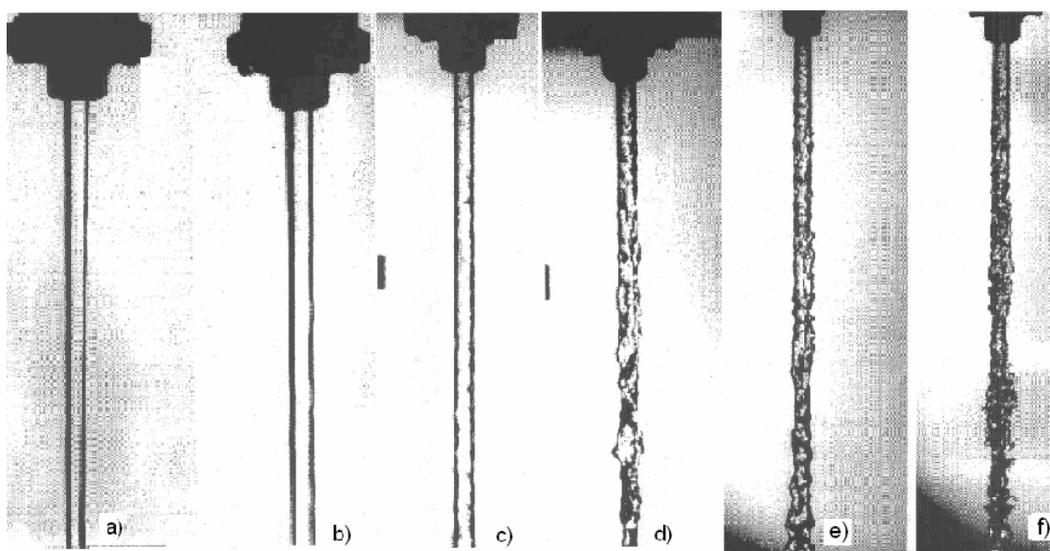


Figura 13 – Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 1.113$, b) $Re_b = 11.137$ c) $Re_b = 33.437$, d) $Re_b = 55.696$, e) $Re_b = 89.113$ e f) $Re_b = 122.537$.

CONCLUSÕES

Relacionados aos dados acima mencionados, a partir do programa autocad 2d e 3d, ver figuras 13,14 e 15, tornou-se possível visualizar as dimensões adequadas das peças..

Dimensões das peças e visualização do Módulo

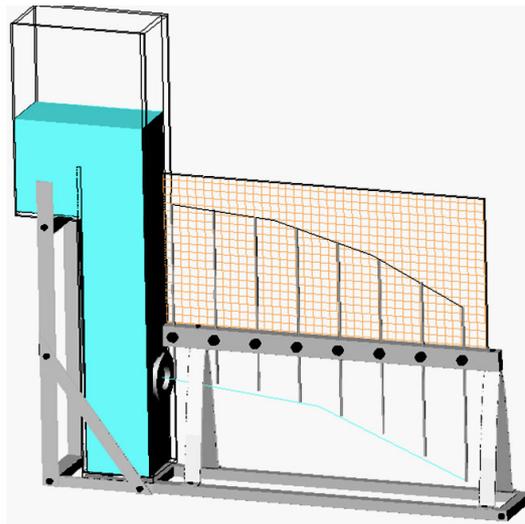


Figura 13 – Visualização em 3D do Módulo

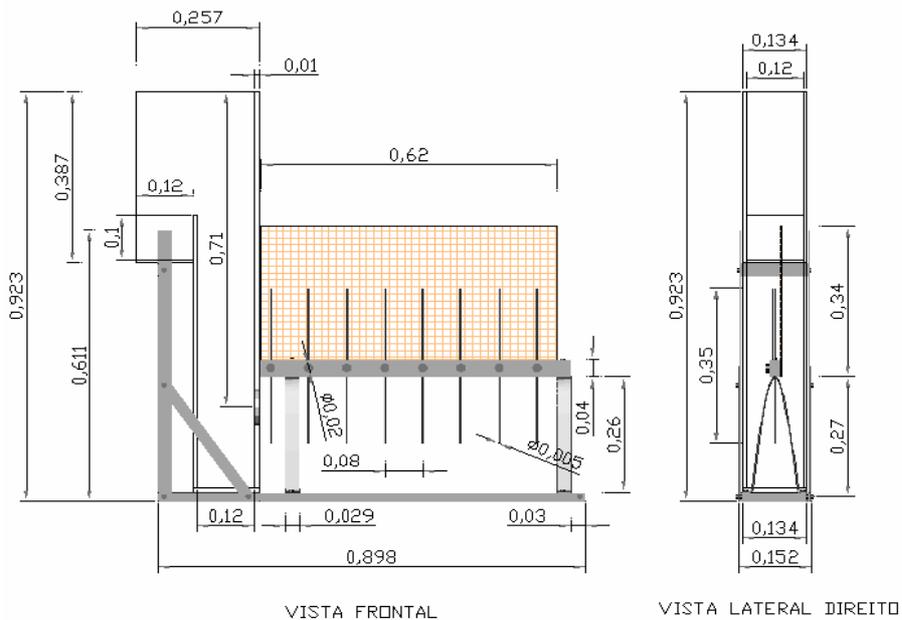


Figura 14 – Dimensões das Peças

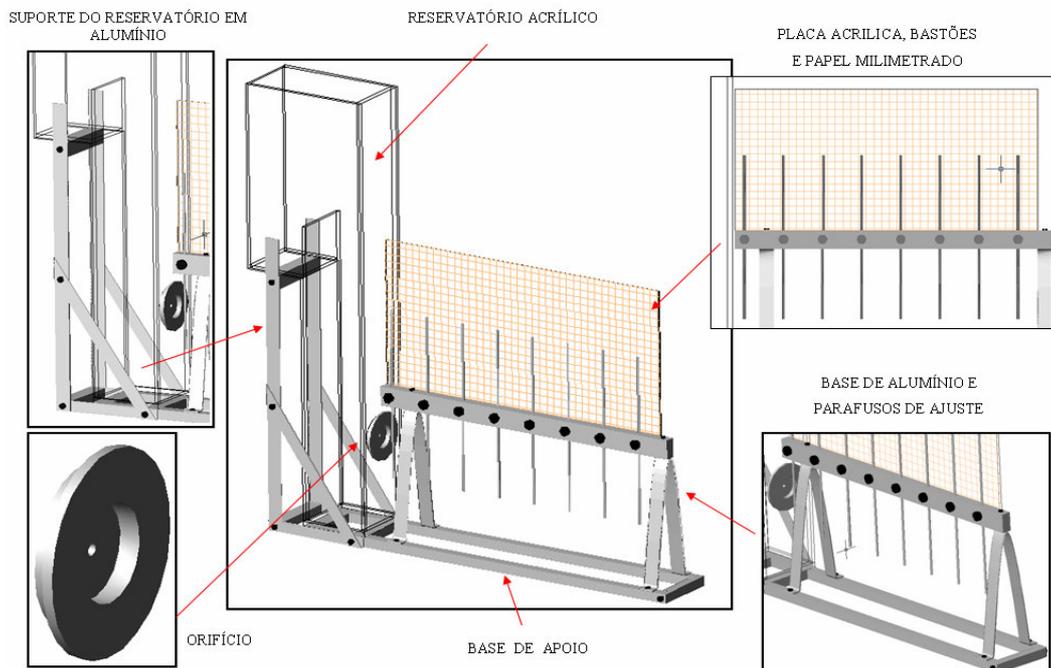


Figura 15 – Equipamentos do Módulo

REFERÊNCIAS

1. PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*, Editora São Carlos, São Paulo, 3ª ed. 2004, 504 p. edição, 2001.
2. PIMENTA, C. F. *Curso de Hidráulica Geral*, Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 4ª ed. 1981, 482 p.
3. NEVES, E. T. *Curso de Hidráulica Geral*, Editora Globo, São Paulo, 9ª ed. 1989, 557
4. TARQUI, J. L. Z., Visualização de fenômenos de alta frequência em um sistema jato-placa, Dissertação de Mestrado na Universidade Federal de Uberlândia, 1996, 120 p.