

## **ELABORAÇÃO DE UM ARRANJO HIDRÁULICO COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA A DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA**

**Williams Luiz A. MONTEIRO; Cláudio Reynaldo B. de SOUZA; Francisco Luiz G. LOPES**

Curso Técnico em Operação de Processos Industriais Químicos – OPIQ-CEFET-BA. Rua Emídio dos Santos S/N,  
Barbalho, Salvador-BA, tel: 71-2102-9499, fax: 71-2102-9507, e-mail: [flglopes@cefetba.br](mailto:flglopes@cefetba.br)

### **RESUMO**

Durante o escoamento de um fluido em um arranjo hidráulico a energia vai se dissipando devido aos atritos com a tubulação e seus acessórios. Seu efeito prático é a queda de pressão no escoamento do fluido, também conhecida como perda de carga ou como energia perdida por peso de fluido para se deslocar de um ponto ao outro. O projeto objetivou elaborar e construir um arranjo hidráulico com materiais alternativos, de baixo custo, fácil montagem e operação, com um roteiro para calcular variáveis que influenciam o escoamento de um fluido em uma tubulação, dentre elas, a perda de energia, de forma experimental. Os materiais para a construção do arranjo hidráulico (tubulações retas, acessórios, válvulas, tanque, bomba centrífuga, etc.) foram e estão sendo adquiridos nas oficinas da sede do Cefet-BA. O guia experimental também contempla uma planilha Excel com *links* para tabelas, figuras e gráficos, tendo como variáveis de entrada a vazão de escoamento do fluido e as tomadas de pressão (que deverão ser medidas via manômetros de líquidos e analógicos), e como variáveis de saída as perdas de carga principal e secundárias contidas no arranjo hidráulico.

**Palavras-chave:** arranjo hidráulico, perda de carga, ferramenta didática.

## 1. INTRODUÇÃO

O trabalho objetivou elaborar e construir um arranjo hidráulico com materiais alternativos, de baixo custo, fácil montagem e operação, com um roteiro para calcular variáveis que influenciam o escoamento de um fluido em uma tubulação, dentre elas, a perda de energia, de forma experimental.

Este trabalho tem um importante aspecto no tocante ao conceito de interdisciplinaridade proposto pela nova metodologia de ensino, ou seja, a aplicação multidisciplinar de conceitos básicos relacionados ao Curso Técnico em Operação de Processos Industriais Químicos, tais como, as ciências básicas (matemática, física, química, etc.) e às aplicadas aos equipamentos (transferência de calor, mecânica dos fluidos e termodinâmica).

Ainda complementando, o ensino técnico profissionalizante da área industrial tem caráter experimental, não estando sujeito apenas a cálculos, fórmulas ou simulações numéricas. Diante desta afirmação é fácil perceber a importância de experimentos em sala de aula, uma vez que estes trazem o conhecimento de uma forma mais palpável e acessível aos alunos.

O projeto disponibilizará ao estudante a visualização prática da perda de carga na linha principal e em acessórios (expansões, reduções, joelhos e válvulas) e também uma ferramenta computacional didática, proporcionando a análise, comparação e interpretação de resultados, reforçando o aprendizado teórico e as habilidades para prever novos resultados.

Os professores ainda podem tirar proveito do arranjo hidráulico de diversas outras formas, sendo assim um equipamento amplo e versátil. A princípio, o arranjo foi anexado com cinco práticas consideradas primordiais na mecânica dos fluidos: medição de vazão, medição de vazão com máquina de fluxo (bomba centrífuga) e análise da energia cedida por esta máquina através de um diferencial de vazões, determinação de regime de escoamento, cálculo da perda de carga principal e cálculo da perda de carga secundária.

Além destas 5 experiências práticas, outras ainda podem ser acrescentadas ao arranjo hidráulico (o arranjo hidráulico é construído com tubulação roscável, linha que permite o monte e desmonte), como por exemplo medição de velocidade utilizando placa de orifício, tubo Venturi e tubo Pitot.

Em virtude das características mencionadas, observamos que o arranjo hidráulico em questão, por ser tão versátil, é de extrema importância em uma escola técnica que trabalhe com a disciplina mecânica dos fluidos, pois permite visualização e comparação entre resultados práticos e teóricos, de maneira simples, objetiva e prazerosa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mecânica dos fluidos (uma parte da hidráulica que se divide em estática, cinética e mecânica dos fluidos) é uma disciplina que pertence ao vasto campo da mecânica aplicada e se preocupa principalmente em estudar os fluidos (líquidos e gases) e suas diversas aplicações. É um dos campos mais importantes da física aplicada, principalmente em questões como meios de transportes e escoamentos industriais. É também um dos campos mais amplos, pois envolve cálculos com carros, tubulações, aeronaves e até capilares sanguíneos. Os princípios da mecânica dos fluidos explicam também porque as aeronaves são construídas com superfícies lisas enquanto as bolas de golfe são construídas com superfícies rugosas. (MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; MUNSON, Bruce R.; DEWITT, David P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos, 1ª edição. LTC Editora.)

Fluidos se assemelham com os sólidos: ambos se deformam quando submetidos a diferentes forças e ambos de alguma forma podem se movimentar. Portanto é preciso para engenheiros e cientistas definições mais precisas e absolutas para fluidos: um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importa quão pequena ela seja. Vale ressaltar que um sólido também se deforma quando lhe é aplicado uma tensão de cisalhamento, só que a diferença para o fluido é que esta não é contínua com o tempo. (W FOX, Robert; T MCDONALD, Alan; J PRITCHARD, Philip. Introdução à MECÂNICA DOS FLUIDOS, 6 edição. LTC Editora.)

Francisco Luiz Gumes Lopes lista e defini em sua apostila ainda não publicada todas as propriedades de um fluido. São elas: Calor específico, Coeficiente de dilatação térmica, Compressibilidade, Densidade relativa, Massa, Peso, Massa específica, Peso específico, Ponto de fluidez, Ponto de fulgor, Pressão de vapor, Viscosidade absoluta ou dinâmica, Viscosidade cinemática, Volatilidade, Volume específico. (LOPES, Francisco Luiz Gumes. Apostila de Mecânica dos Fluidos. Sem edição e distribuição.)

Para estudar Mecânica dos fluidos inicialmente consideramos o conceito de pressão. Pressão é a relação entre a intensidade da força que atua perpendicularmente e a área em que ela se distribui. Ela será tanto maior, quanto menor for a sua área de contato. Sua equação direta se resume da seguinte forma:

$$P = \frac{F}{A}, \text{ onde } P \text{ é a pressão, } F \text{ é a força e } A \text{ é a área de contato.}$$

No SI, a unidade da pressão é o pascal (Pa), mas ela também pode ser obtida em Ba, PSI, Atm, kgf/cm<sup>2</sup> etc. A relação de transformação fundamental é: 1 Atm = 101292,8 Pa = 14,2 PSI. (RAMALHO, Francisco; GILBERTO, Nicolau; TOLEDO, Paulo Antonio de. Os Fundamentos da Física 1, 8 edição. Editora Moderna.)

Para um fluido em movimento, quatro equações básicas e elementares são válidas para descrever suas características: equação da continuidade, equação de momento, equação de Bernoulli, equação de energia mecânica.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{Equação da continuidade}$$

$$F_r = \dot{m} (v_2 - v_1) \quad \text{Equação de momento}$$

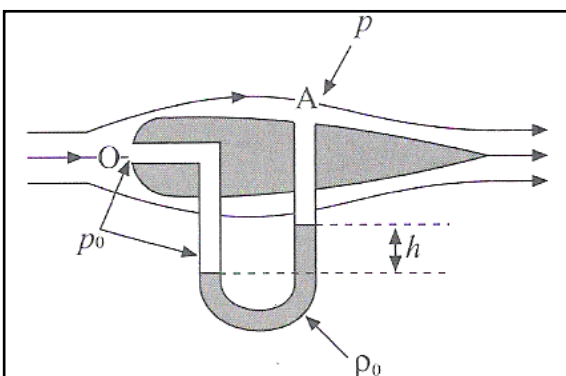
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \gamma z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \gamma z_2 \quad \text{Equação de Bernoulli}$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \gamma z_1 + h_p - h_l - h_t = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \gamma z_2 \quad \text{Equação de Energia Mecânica}$$

Onde “A” é seção transversal do fluido, “v” é velocidade,  $\dot{m}$  é vazão mássica, p é pressão,  $\rho$  é viscosidade,  $\gamma$  é peso específico,  $h_p$  é energia de bombas,  $h_l$  é perda de carga e  $h_t$  é energia de turbinas.

Estas equações se baseiam nas leis de Newton, na conservação da energia da energia e nos balanços materiais comuns em tubulação uma vez unidos aos conceitos de massa específica e pressão. Ao aplicarmos estas equações, desconsideramos as forças dissipativas (forças viscosas), forças que se opõem ao movimento do fluido e geram perda de carga. (RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física, volume , 7º edição. São Paulo: LTC – 2006.)

Dentre estas quatro equações, nos restringiremos à equação da continuidade e a equação de Bernoulli. A equação de Bernoulli possui aplicações destacáveis como o tubo Pitot e o tubo Venturi. Para o tubo de Pitot insere-se inicialmente um tubo no meio da linha de escoamento e este cria um ponto O (indicado na figura), onde o fluido é freado e a velocidade torna-se nula. Tal ponto é denominado estagnação e constitui-se no princípio de medição do tubo de Pitot, uma vez que eliminamos uma incógnita da equação de Bernoulli e esta se reduz a:

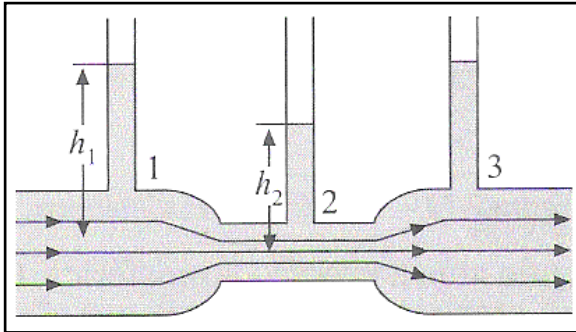


$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V^2$$

Onde  $p_1$  é a pressão no ponto O e  $p_2$  é a pressão no ponto A. A velocidade V a ser calculada é a velocidade em A, onde não há perturbação. Como  $p_1$  e  $p_2$  podem ser medidos pelo desnível h, reduz-se a equação para o cálculo da velocidade de escoamento:

$$V = \sqrt{\frac{2gh\rho'}{\rho}}$$

Onde  $\rho'$  é a massa específica do fluido manométrico e  $\rho$  é massa específica do fluido que escoar na tubulação. Para o tubo Venturi consiste em criar uma redução em um escoamento com posterior expansão para uma mesma bitola. Utilizando tomada de pressão conforme a figura abaixo, podemos calcular a velocidade  $V$  de escoamento. Observe:

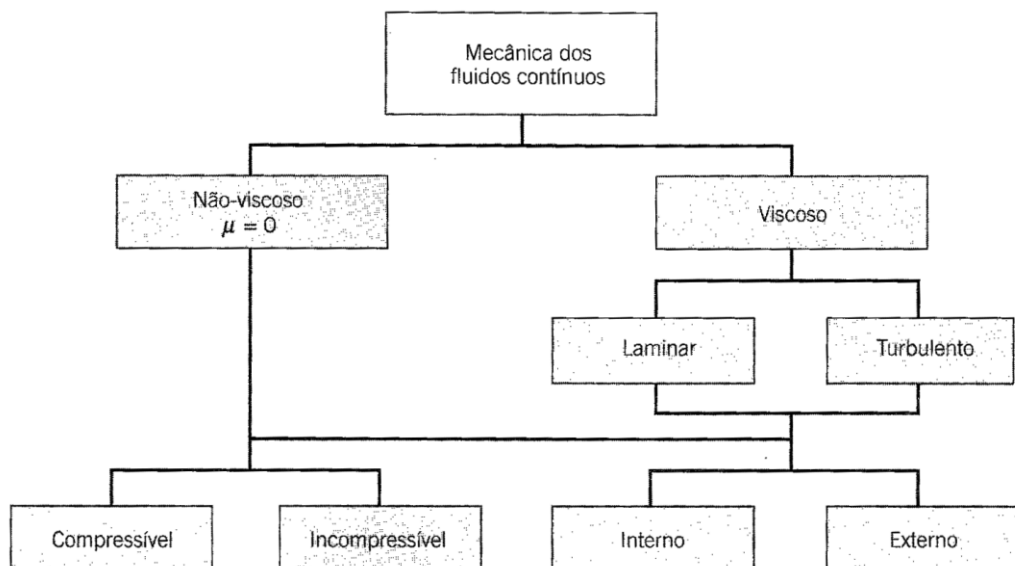


$$V = \frac{\pi D_2^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2)}}$$

Onde os índices 1 e 2 indicam as seções das tubulações indicadas na figura com seus respectivos diâmetros  $D$ .

Tubo Pitot e tubo Venturi: (NUSSENZVEIG, Herch Moyses. Curso de Física Básica, volume 2, 4ª edição. São Paulo: Blucher – 2002.)

Os diversos tipos de escoamentos são listados por Fox, McDonald e Pritchard: escoamento viscoso e não-viscoso, escoamento laminar e turbulento, escoamento compressível e incompressível, escoamento interno e externo.



A mecânica dos fluidos é uma disciplina da física experimental, que depende, portanto, de uma análise de dados obtidos experimentalmente. Esta análise segue regras descritas na disciplina de Análise Dimensional. A Análise Dimensional é uma ferramenta de grande valia no estudo da física, prestando-se para identificar grandezas, obter suas respectivas unidades de medida, verificar a homogeneidade de equações e prever expressões matemáticas a partir de conclusões experimentais. (HELOU, Ricardo; BISCUOLA, Gualter José; BOAS, Newton Vilas. Tópicos de Física 3, 17ª edição. Editora Saraiva.)

Os escoamentos completamente limitados por superfícies sólidas são denominados escoamentos internos. Desse modo, os escoamentos internos incluem escoamentos em tubos, dutos, bocais, difusores, contrações, expansões, válvulas e outros acessórios. Os escoamentos internos podem ser laminares ou turbulentos. Alguns casos de escoamentos laminares podem ser resolvidos analiticamente. No caso de escoamento turbulento, as soluções analíticas não são possíveis e devemos apoiar-nos fortemente em teorias semi-

empíricas e em dados experimentais. (W FOX, Robert; T MCDONALD, Alan; J PRITCHARD, Philip. Introdução à MECÂNICA DOS FLUIDOS, 6 edição. LTC Editora.)

Quando a velocidade do escoamento de um fluido supera um certo valor crítico, o escoamento deixa de ser laminar e passa a ser chamado de turbulento. A configuração do escoamento torna-se extremamente irregular e complexa variando continuamente com o tempo. Este escoamento irregular e caótico denomina-se turbulência. Para a turbulência não vale aplicar as leis de Newton e por isso a sua profunda compreensão esta representa um grande desafio para os físicos. Por outro lado, no escoamento laminar (onde o fluido é newtoniano) a força de viscosidade é proporcional a taxa de deformação (lei de Newton da viscosidade). Quando o fluido de viscosidade  $\mu$  escoar no interior de um tubo cilíndrico de diâmetro  $D$  por um comprimento  $L$  que gera um diferencial de pressão  $\Delta P$ , a vazão volumétrica é dada pela lei de Poiseuille

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta P}{128 \mu L}.$$

(YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física II, 10ª Edição. São Paulo; Editora Pearson Addison Wesley, 2004.)

### 3. METODOLOGIA

#### *a. Revisão de literatura.*

Foi realizado o levantamento bibliográfico acerca dos assuntos pertinentes ao entendimento de mecânica dos fluidos (fluidos em equilíbrio estático e dinâmico, fluidos em movimentos e máquinas de fluxo) e mecânica dos fluidos aplicada (análise dimensional e tubulações).

#### *b. Seleção de materiais.*

Houve um significativo atraso na aquisição de materiais para montagem do arranjo hidráulico, constituindo-se na maior dificuldade encontrada para o desenvolvimento do projeto. Apesar de o arranjo hidráulico ter sido projetado para custar barato, o aprofundamento do projeto revelou uma maior complexidade na elaboração do arranjo. Alguns materiais foram obtidos nas oficinas do CEFET-BA.

#### *c. Elaboração das plantas do equipamento.*

As plantas foram elaboradas baseadas em informações obtidas na literatura e na disponibilidade dos materiais adquiridos e/ou confeccionados. As mesmas foram feitas em papel A3, em caráter de esboço referencial das peças do equipamento e implementadas no *software autocad mep 2008*.

### 4. RESULTADOS ALCANÇADOS

#### *a. Construção do arranjo hidráulico.*

Devido às dificuldades para a aquisição dos materiais necessários à montagem do arranjo hidráulico, o mesmo ainda não está concluído, no entanto, toda a concepção e detalhes do arranjo já estão concluídos. É importante ressaltar que a maior parte dos materiais já foi adquirida, sem custo para o projeto.

As Figuras 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam detalhes do arranjo hidráulico em perspectiva.

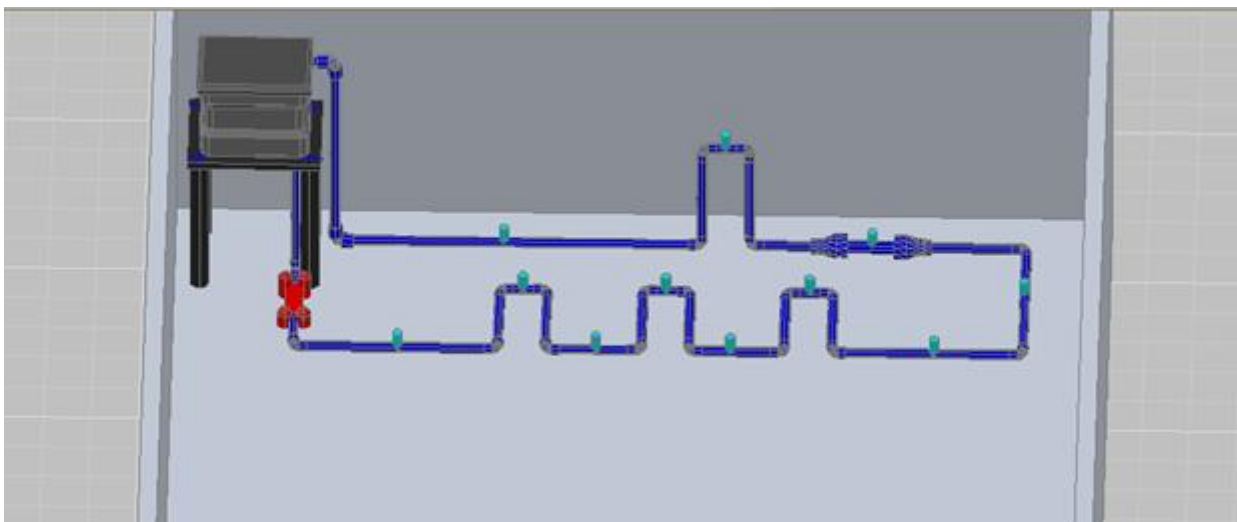


Figura 1. Planta tridimensional do arranjo hidráulico.

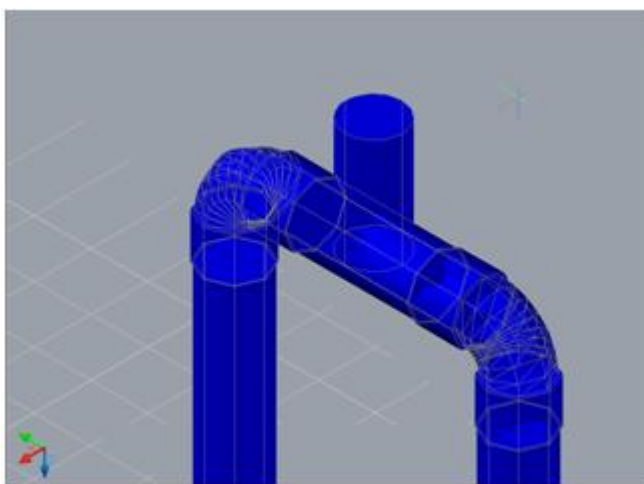


Figura 2. Tomada de pressão.

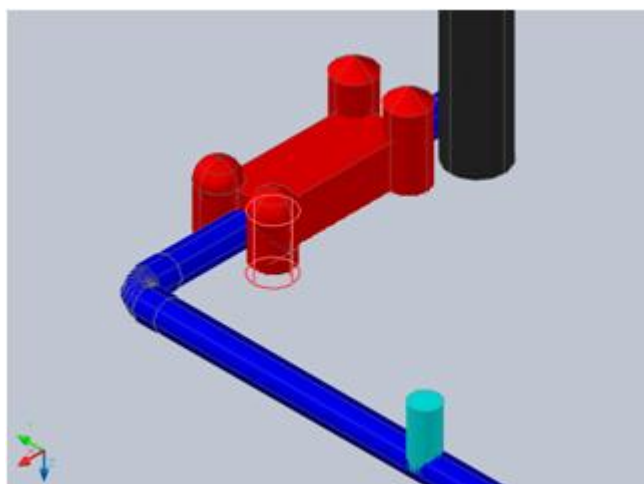


Figura 3. Bomba centrífuga.

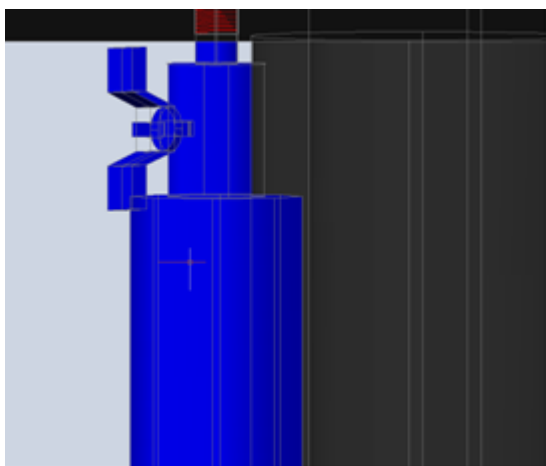


Figura 4. Registro de esfera.

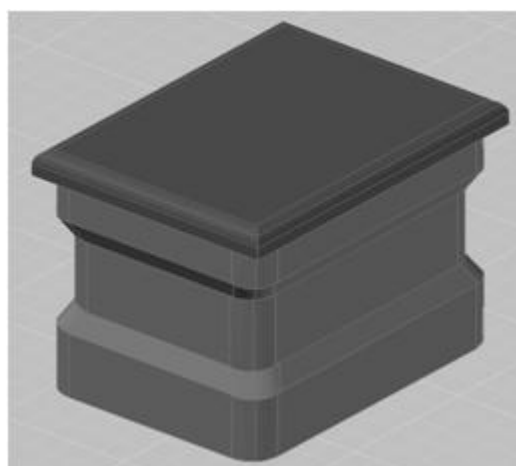


Figura 5. Detalhe do tanque de armazenamento.

*b. Modelagem do arranjo hidráulico.*

O *software excel* está sendo utilizado para a modelagem do arranjo hidráulico. As equações de queda de pressão, perda de carga principal e secundária, número de Reynolds e vazão volumétrica estão implementadas na planilha.

As tabelas e gráficos para a determinação de constantes (diâmetro equivalente, fator de atrito, viscosidade, massa específica, etc.) estão sendo incrementados à planilha.

A planilha a ser utilizada segue o modelo das Tabelas 1, 2 e 3, fornecendo para cada trecho do arranjo hidráulico os valores da perda de carga principal e/ou secundária.

Tabela 1 – Obtenção de dados para o cálculo da vazão.

Etapa	Volume conhecido do recipiente (m <sup>3</sup> )	Tempo (segundos)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)

Tabela 2 – Obtenção de dados para o cálculo da perda de carga principal.

Trecho	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$V$ (m/s)	$L$ (m)	$D$ (m)	$\Delta p$ (pascal)	$f$	$H_p$ (m)

Tabela 3 – Obtenção de dados para o cálculo da perda de carga secundária.

Trecho	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$V$ (m/s)	$L_e/D$	$\Delta p$ (pascal)	$f$	$H_s$ (m)

*c. Elaboração de apostila e guia de execução do experimento.*

Foi elaborada uma apostila com assuntos pertinentes à mecânica dos fluidos para ser utilizada como apoio didático ao curso técnico e integrado (conceitos, cálculos elementares e redes de tubulações direcionadas à compreensão do arranjo hidráulico) e um roteiro para a execução da aula prática sobre perda de carga (procedimento experimental, coleta, análise e discussão dos resultados). Apresenta-se a seguir um resumo deste roteiro.

c.1. Roteiro básico do guia de execução do experimento.

Etapas – 1. Medição da vazão e do regime de escoamento.

A determinação da vazão e do regime de um escoamento (Número de Reynolds) é fundamental para o cálculo de outras variáveis em um arranjo hidráulico e por isto é considerado o ponto de partida do experimento. Deve-se considerar o escoamento completamente desenvolvido para o fluido. As Equações 1 e 2 de terminam a vazão e o regime de escoamento, respectivamente.

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot v}{4} \quad \text{Equação 1.}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Equação 2.}$$

Onde  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $v$  a velocidade de escoamento,  $\rho$  a massa específica do fluido e  $\mu$  a viscosidade absoluta do fluido.

Etapas – 2. Determinação da perda de carga utilizando as tomadas de pressão.

Serão utilizados dois manômetros, colocados em dois pontos diferentes da tubulação (tomadas de pressão), para a determinação direta da perda de carga através da diferença de pressão dos manômetros. Deve-se comparar a perda de carga determinada experimentalmente com aquela fornecida pela equação de Darcy-Weisbach (Equação 3), onde o coeficiente de atrito será fornecido pelo diagrama de Moody. Deve-se, também, calcular o fator de atrito utilizando a relação de Colebrook-White (Equação 4).

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad \text{Equação 3.}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Equação 4.}$$

Onde  $h_f$  é a perda de carga principal (para o escoamento em trechos retos da tubulação),  $L$  o comprimento da tubulação reta,  $f$  o fator de atrito,  $\varepsilon/D$  a rugosidade relativa e  $g$  a aceleração da gravidade.

Para o cálculo da perda de carga secundária (acessórios do arranjo hidráulico) deve-se utilizar a Equação 5.

$$h_s = K \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equação 5.}$$

Onde  $h_s$  é a perda de carga secundária e  $K$  um coeficiente que depende do tipo de acessório e é obtido em tabelas. Novamente tomadas de pressão devem ser acopladas antes e depois de um acessório da tubulação para a determinação experimental através da leitura da diferença de pressão entre os manômetros. Deve-se comparar a perda de carga secundária determinada experimentalmente com aquela fornecida pela Equação 5.

Etapas – 3. Determinação da velocidade de escoamento utilizando um tubo venturi.

Entre uma redução e uma expansão no escoamento para uma mesma bitola, deve-se determinar, experimentalmente, as pressões nos trechos. Utilizando a Equação 6 calcula-se a velocidade de escoamento utilizando o venturi. Esta velocidade deve ser comparada com a calculada na etapa 1.

$$v = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot \Delta P}{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2)}} \quad \text{Equação 6.}$$

Onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão determinada experimentalmente e  $D_1$  e  $D_2$  os diâmetros da expansão e redução, respectivamente.



## 5. CONCLUSÕES

Durante todo o período de desenvolvimento do projeto foi enfrentada muita dificuldade para a aquisição de materiais que atendessem as necessidades do arranjo hidráulico, uma vez que o mesmo necessitaria ter boa qualidade e não representasse ônus ao projeto.

Grande parte dos materiais usados foi adquirida em depósitos de rejeitos e de sobras das oficinas da Cefet-BA e também através de doações.

A revisão de literatura realizada na área de mecânica dos fluidos foi muito ampla e proporcionou muito conhecimento.

O arranjo hidráulico proporcionará a realização de experimentos na área de escoamento dos fluidos, possibilitando calcular variáveis importantes tais como, vazão, velocidade, queda de pressão, regime de escoamento e perda de carga em tubulações simples e em acessórios.

O projeto ainda proporcionará ao aluno um estudo mais aprofundado dos conceitos sobre o escoamento dos fluidos, aplicação do balanço material e energético em tubulações, possibilitando por em prática conhecimentos teóricos adquiridos, além do estímulo ao conhecimento em técnicas de pesquisa, ao aperfeiçoamento do trabalho em equipe e à análise e a interpretação de novos resultados.

Assim, os alunos e professores dos Cursos Técnicos do CEFET-BA que necessitam do estudo da mecânica dos fluidos, terão disponível um arranjo hidráulico para a determinação de variáveis fundamentais que interferem no escoamento dos fluidos, com uma apostila explicativa e um guia completo para execução e discussão do experimento.

## REFERÊNCIAS

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física II, 10ª Edição. São Paulo; Editora Pearson Addison Wesley, 2004.

W FOX, Robert; T MCDONALD, Alan; J PRITCHARD, Philip. Introdução à MECÂNICA DOS FLUIDOS, 6 edição. LTC Editora.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; MUNSON, Bruce R.; DEWITT, David P. Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos, 1ª edição. LTC Editora.

RAMALHO, Francisco; GILBERTO, Nicolau; TOLEDO, Paulo Antonio de. Os Fundamentos da Física 1, 8 edição. Editora Moderna.

NUSSENZVEIG, Herch Moyses. Curso de Física Básica, volume 2, 4ª edição. São Paulo: Blucher – 2002.

LOPES, Francisco Luiz Gumes. Apostila de Mecânica dos Fluidos. Sem edição e distribuição.

HELOU, Ricardo; BISCUOLA, Gualter José; BOAS, Newton Vilas. Tópicos de Física 3, 17ª edição. Editora Saraiva.

RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física, volume , 7ª edição. São Paulo: LTC – 2006.

## AGRADECIMENTOS

O bolsista Williams Luiz Almeida Monteiro agradece a todos os servidores do Cefet-BA que contribuíram para a execução deste projeto e à FAPESB pela concessão da Bolsa de Iniciação Científica Júnior.