

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO
PROFESSOR MIGUEL REALE

MARCELO BARBASSA
MIGUEL REZINA NETO
PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SILVA

**PROJETO DE BANCADA DIDÁTICA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS PARA
DETERMINAÇÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBA CENTRÍFUGA.**

SÃO PAULO
2026

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**MARCELO BARBASSA
MIGUEL REZINA NETO
PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SILVA**

**PROJETO DE BANCADA DIDÁTICA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS PARA
DETERMINAÇÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBA CENTRÍFUGA.**

Trabalho acadêmico realizado como requisito
parcial para a conclusão do Curso Superior de
Tecnologia em Refrigeração, Ventilação e Ar
Condicionado.

Orientador(a): Prof. Dra. Telma Nagano de Moura

SÃO PAULO

2026

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCELO BARBASSA

MIGUEL REZINA NETO

PAULO HENRIQUE DOS SANTOS SILVA

**PROJETO DE BANCADA DIDÁTICA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS PARA
DETERMINAÇÃO DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBA CENTRÍFUGA.**

Aprovado em/...../.....

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Telma Nagano de Moura
FATEC/ITAQUERA

...../...../.....

Prof. Dr. Sergio Turano de Souza
FATEC/ITAQUERA

...../...../.....

Prof. Dr. Etevaldo F. Carreira Jr
FATEC/ITAQUERA

...../...../.....

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho ao Senhor Deus, fonte de todo saber, que iluminou os nossos pensamentos e orientou nossas mãos para que pudéssemos entregar um resultado consistente.

Com os corações gratos, ofertamos este fruto de dedicação a todos para edificar, instruir e integrar teoria e prática, dessa forma, possamos refletir o compromisso que assumimos com o ensino compartilhado, e que ele seja instrumento de esperança, luz e serviço.

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele tudo fará” (Salmos 37:5). Guiados por essa convicção, conduzimos cada escolha técnica, ensaio e discussão com integridade, responsabilidade e dedicação, confiando que todo esforço seria recompensado segundo a vontade de Deus.

Da mesma forma, procuramos seguir o ensinamento de que “Tudo quanto fizerdes, fazei-o de todo o coração, como para o Senhor e não para os homens” (Colossenses 3:23). Assim, mesmo diante dos desafios, das decisões e das diferentes perspectivas encontradas ao longo deste projeto, prevaleceram a sinceridade, a cooperação e o compromisso comum com a excelência acadêmica.

Aos pais e familiares, que com amor nos ampararam e guiaram nossos caminhos, aos professores, todo o corpo docente da instituição e aos colegas que compartilharam aprendizado.

Consagramo-nos, consciente de que o Senhor Deus dirige os passos do homem, logo, que este trabalho transforme em instrumento de fulgor, serviço, e compartilhamento entre todos que utilizarão.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos, acima de tudo, de agradecer a Deus por este momento e por nos conceder força e sabedoria ao longo desta jornada acadêmica. Em cada etapa, os desafios contribuíram para o nosso crescimento, permitindo que alcançássemos nossos objetivos com fé, dedicação e perseverança.

Expressamos nossa gratidão à Prof. Dra. Telma, orientadora deste trabalho, cuja atenção, apoio contínuo e incentivo à excelência foram fundamentais para a realização e conclusão desta etapa do projeto.

Agradecemos também ao Prof. Dr. Turano, por aceitar participar da banca examinadora, compartilhar sua experiência pelas contribuições acadêmicas e avaliação criteriosa.

Ao Prof. Dr. Etevaldo, igualmente membro da banca examinadora, deixamos nosso reconhecimento pelas observações construtivas, pela atenção dispensada e pela valiosa contribuição acadêmica.

Não poderíamos deixar de agradecer ao Diretor Sr. Luís, juntamente ao corpo docente, técnico e administrativo da instituição, pelo suporte oferecido ao desenvolvimento deste estudo. Estendemos também nossos agradecimentos à Franklin Electric, fabricante da linha Schneider pela doação das bombas centrífugas utilizadas no projeto.

Por fim, agradecemos a todos que apoiaram nossa trajetória acadêmica até aqui. O incentivo e a colaboração de cada um foram essenciais para a concretização deste trabalho.

RESUMO

A Mecânica dos Fluidos desempenha papel fundamental na formação profissional em Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado (REVAC), especialmente no estudo de sistemas de bombeamento hidráulico. Nesse contexto, a utilização de recursos experimentais contribui para a compreensão prática de fenômenos como vazão, pressão, perdas de carga e desempenho de bombas, complementando o aprendizado teórico. Diante disso, o trabalho teve como objetivo projetar, construir e validar uma bancada didática de Mecânica dos Fluidos destinada à determinação da curva característica de uma bomba centrífuga, contribuindo para o ensino prático dos conceitos relacionados ao escoamento de fluidos. A metodologia adotada compreendeu pesquisa bibliográfica sobre os fundamentos teóricos da Mecânica dos Fluidos, dimensionamento hidráulico da bancada, seleção dos componentes, construção da estrutura experimental e realização de ensaios para coleta de dados de vazão, pressão de sucção e pressão de recalque. Os resultados obtidos permitiram a determinação da curva característica da bomba centrífuga BC-98, bem como a análise das perdas de carga, das condições de operação e do comportamento hidráulico do sistema. As curvas experimentais apresentaram comportamento compatível com os fundamentos teóricos e com as características esperadas para bombas centrífugas, evidenciando a funcionalidade da bancada desenvolvida. Além disso, o projeto demonstrou viabilidade técnica e econômica, utilizando componentes de boa qualidade e custo acessível quando comparados aos equipamentos laboratoriais comerciais. Sendo assim, a bancada didática desenvolvida atingiu os objetivos propostos, constituindo uma ferramenta eficaz para a integração entre teoria e prática no ensino, além de apresentar potencial para futuras ampliações voltadas à automação, quadros de comandos elétricos, manuais de utilização para realização de novos experimentos acadêmicos.

Palavras-chave: Mecânica dos Fluidos; Bancada didática; Bomba centrífuga; Curva característica da bomba; Perda de carga.

ABSTRACT

Fluid Mechanics plays a fundamental role in professional training in Refrigeration, Ventilation and Air Conditioning (REVAC), especially in the study of hydraulic pumping systems. In this context, the use of experimental resources contributes to the practical understanding of phenomena such as flow rate, pressure, head loss and pump performance, complementing theoretical learning. Therefore, this work aimed to design, build and validate a didactic Fluid Mechanics bench for determining the characteristic curve of a centrifugal pump, contributing to the practical teaching of concepts related to fluid flow. The methodology adopted comprised bibliographic research on the theoretical foundations of Fluid Mechanics, hydraulic dimensioning of the bench, selection of components, construction of the experimental structure, and carrying out tests to collect data on flow rate, suction pressure, and discharge pressure. The results obtained allowed the determination of the characteristic curve of the BC-98 centrifugal pump, as well as the analysis of head losses, operating conditions, and hydraulic behavior of the system. The experimental curves showed behavior compatible with the theoretical fundamentals and the expected characteristics for centrifugal pumps, highlighting the functionality of the developed test bench. Furthermore, the project demonstrated technical and economic viability, using high-quality components at an affordable cost when compared to commercial laboratory equipment. Thus, the developed didactic test bench achieved its proposed objectives, constituting an effective tool for integrating theory and practice in teaching, and showing potential for future expansions focused on automation, electrical control panels, and user manuals for conducting new academic experiments.

Keywords: Fluid Mechanics; Didactic bench; Centrifugal pump; Pump characteristic curve; Head loss.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A - Área (m)

CCB - Curva característica da bomba

dh - Diâmetro hidráulico (m)

f - Coeficiente de perda de carga (adimensional)

F - Força (N)

g - Gravidade (m/s^2)

GPa - Módulo de elasticidade (Pa)

H - Carga (m)

H_{est} - Carga estática (m)

HB - Carga da bomba ou altura manométrica (m)

H_m - Altura manométrica (m)

H_p - Perda de carga (m)

h_f - Perda de carga distribuída (m)

h_s - Perda de carga singular (m)

K - Rugosidade relativa (adimensional)

K_s - Coeficiente de forma (adimensional)

L - Comprimento (m)

L_{eq} - Comprimento equivalente da singularidade (m)

m (Massa) Kg

M - Momento fletor ($N.m$)

$m.c.a$ - metros coluna d'água (Pa)

NBR (Norma Brasileira)

p - Peso (N)

P - Pressão (Pa)

P_{atm} - Pressão atmosférica (Pa)

PPC (Projeto pedagógico curricular)

Q - Vazão (m^3/s)

REVAC (Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado)

Re - Número de Reynolds (adimensional)

v - Velocidade do escoamento (m/s)

LISTA DE SÍMBOLOS

ε (rugosidade absoluta)

z (cota ou altura)

ρ (massa específica do fluido)

μ (viscosidade dinâmica)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço S235.....	45
Tabela 2 - Relação de elementos parciais da bancada.....	47
Tabela 3 - Dados vazão e carga manométrica com 01 bomba ligada.....	51
Tabela 4 - Dados vazão e carga manométrica com 02 bombas ligadas.....	53
Tabela A.1 - Coeficientes de forma.....	68
Tabela A.2 - Comprimentos equivalentes em metros de acessórios.....	69
Tabela A.3 - Valores da rugosidade.....	70
Tabela D.1 - Memorial de cálculo da vazão e velocidade.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de perdas de carga singulares.....	24
Figura 2 - Equação da continuidade.....	27
Figura 3 - Equação da energia com presença de máquina.....	28
Figura 4 - Representação da rugosidade em tubulações.....	32
Figura 5 - Diagrama de Moody – Rouse.....	33
Figura 6 - Curva característica: (a) Estável; (b) Instável.....	35
Figura 7 - Tipos de curvas estáveis (a) crescente; (b) muito crescente; (c) Plana.....	36
Figura 8 - Ponto de operação de uma bomba centrífuga.....	37
Figura 9 - Circuito hidráulico fechado.....	38
Figura 10 - Circuito hidráulico aberto.....	39
Figura 11 - Início da construção da bancada.....	44
Figura 12 - Representação Diagrama do corpo Livre.....	46
Figura 13 - Montagem parcial da estrutura.....	46
Figura 14 - Bancada didática.....	48
Figura 15 - Bomba centrífuga Schneider modelo BC-98.....	49
Figura 16 - Curva característica com uma bomba ligada.....	52
Figura 17 - Curva característica com duas bombas ligadas.....	53
Figura 18 - CCB fabricante com duas bombas ligadas.....	57
Figura 19 - Curva característica comparativa.....	61
Figura B.1 - Vista da bancada no AutoCAD.....	70
Figura B.2 - Fluxograma hidráulico da bancada.....	71
Figura C.1 - Corte 01 da bancada hidráulica.....	72

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivo geral	15
1.3 Objetivos específicos	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Equilíbrio de carga da estrutura	16
2.1.1 <i>Momento fletor máximo</i>	18
2.2 Máquinas de fluxo	18
2.3 Comportamento dos fluidos incompressíveis	19
2.4 Bombas centrífugas	20
2.5 Classificação das bombas centrífugas	20
2.6 Funcionamento da bomba centrífuga	21
2.7 Diâmetro projeto	22
2.8 Perdas de carga	23
2.8.1 <i>Classificação das perdas de carga</i>	23
2.8.2 <i>Perda de carga distribuída</i>	23
2.8.3 <i>Perda de carga singular</i>	24
2.9 Equação da continuidade	26
2.10 Equação da energia para fluido real com máquina	28
2.11 Número de Reynolds (Re)	30
2.12 Rugosidade uniforme/absoluta	32
2.13 Fator de atrito	32
2.14 Curva característica da bomba (CCB)	33
2.14.1 <i>Tipos de curvas características</i>	34
2.14.2 <i>Ponto inicial de operação</i>	36
2.15 Circuito hidráulico fechado	37
2.16 Circuito hidráulico aberto	38
2.17 Teorema fundamental da hidrostática (Lei de Stevin)	40
2.18 Cavitação	41

3 MÉTODOS E MATERIAIS	42
3.1 Métodos	42
3.2 Materiais	42
4 PROJETO	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 Resultados	50
5.2 Discussões	54
5.2.1 Projeto de construção da bancada	54
5.2.2 Considerações sobre Sistemas Hidráulicos da Bancada Didática	55
5.2.3 Escolha do diâmetro de projeto	56
5.2.4 Aquisição dos materiais e equipamentos	58
5.2.5 Procedimento de startup do experimento	58
5.2.5.1 Ligação da primeira bomba	58
5.2.5.2 Ligação da segunda bomba	59
5.2.6 Determinação experimental da Curva Característica da Bomba	60
5.2.7 Análise das condições de sucção e verificação de possibilidade de cavitação	62
6 CONCLUSÃO	63
7 REFERÊNCIAS	65
8 ANEXO A - Referencial teórico	67
9 APÊNDICE B - Referencial teórico	70
10 APÊNDICE C – Discussões	72
11 APÊNDICE D – Discussões	73

1 INTRODUÇÃO

A Mecânica dos Fluidos é a ciência que estuda o comportamento físico dos fluidos, assim como as leis que regem esse comportamento.

O aprendizado teórico na instituição abrange diversas disciplinas relacionadas à Mecânica dos Fluidos no curso de Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado (REVAC), como Fenômenos de Transporte, Hidráulica e Pneumática, Ventilação Geral, Ventilação Local e Exaustora, Máquinas de Fluxo e Termodinâmica. Embora a teoria seja necessária, muitas vezes observa-se uma lacuna na compreensão dos fenômenos, tornando indispensável o desenvolvimento de práticas experimentais que permitam a visualização e análise direta dos conceitos estudados no curso de REVAC.

As observações realizadas motivaram o desenvolvimento de uma bancada didática de Mecânica dos Fluidos, com o desejo de promover a integração entre alunos e o processo teórico-prático no contexto acadêmico. A proposta possibilita a determinação da curva característica de bombas centrífugas, bem como a análise das perdas de carga em tubulações e a operação de válvulas de controle em atividades experimentais de laboratório. Além disso, o projeto apresenta potencial de continuidade acadêmica, permitindo a incorporação de novos equipamentos e melhorias tecnológicas.

Com a consecução do projeto, esse recurso didático disponibilizará aplicabilidade direta na comparação entre os conceitos teóricos e resultados experimentais por meio de cálculos.

O projeto da bancada tem a possibilidade de integrar teoria, prática e análise experimental, oferecendo uma contribuição significativa para o ensino-aprendizado de Mecânica dos Fluidos e desenvolvimento de habilidades práticas essenciais à formação profissional.

1.1 Justificativa

O ensino de Mecânica dos Fluidos apresenta desafios significativos quando se baseia apenas em conteúdos teóricos, uma vez que diversos fenômenos, como as perdas de carga e o comportamento de bombas, são de difícil visualização quando analisados exclusivamente por meio de explicações em sala de aula.

Segundo Barros et al. (2020) esclarecem que: a relação teoria e prática na formação docente é condição essencial para o trabalho pedagógico.

A reflexão proposta pelos autores evidencia que a relação entre teoria e prática não deve ser compreendida de forma fragmentada, mas como um processo contínuo e interdependente.

Nesse contexto, o desenvolvimento do projeto permite a observação direta dos efeitos do escoamento de fluidos em tubulações, conexões e medidores de vazão, possibilitando a comparação entre resultados teóricos e experimentais por meio de cálculos.

1.2 Objetivo geral

Tem-se como objetivo geral projetar, construir e desenvolver uma bancada didática para estudos experimentais em Mecânica dos Fluidos, com a finalidade de realizar o levantamento da curva característica da bomba.

A bancada poderá ser utilizada em diversas disciplinas do Projeto Pedagógico do Curso (PPC) de Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado (REVAC), tais como Fenômenos de Transporte, Hidráulica e Pneumática, Ventilação Geral, Ventilação Local e Exaustora, Máquinas de Fluxo e Termodinâmica.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos consistem nas ações necessárias para atingir o objetivo geral, conforme descrito a seguir:

- Desenvolver o projeto hidráulico para a construção da bancada didática;
- Realizar procedimentos experimentais para a coleta de dados destinados ao levantamento da CCB (curva característica da bomba);
- Levantar a CCB da bomba centrífuga BC-98, possibilitando a comparação entre dados teóricos e experimentais da instalação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para compreender as dificuldades na relação entre teoria e prática nas disciplinas de Fenômenos de Transporte, Ventilação Geral, Ventilação Local e Exaustora, Máquinas de Fluxo e Termodinâmica, torna-se necessário analisar o processo pedagógico envolvido no ensino-aprendizagem. Diante disso, é fundamental compreender a integração entre os conteúdos teóricos e suas aplicações práticas.

A busca sistemática pelo conhecimento constitui condição essencial para a compreensão dos fenômenos associados à Mecânica dos Fluidos, possibilitando a análise do desempenho de sistemas de escoamento de fluidos incompressíveis, especialmente daqueles acionados por bombas centrífugas, responsáveis pela conversão de energia mecânica em energia de pressão e velocidade do fluido.

O estudo experimental proposto motivou a busca por trabalhos acadêmicos relacionados ao tema, os quais contribuíram para a fundamentação teórica deste projeto. Destaca-se um estudo desenvolvido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais, no qual foi elaborada uma bancada didática destinada à análise de perdas de carga em tubulações, válvulas e conexões, bem como à determinação da curva característica de bombas centrífugas.

Essas iniciativas evidenciam a importância da prática experimental no processo de ensino-aprendizagem, contribuindo para a consolidação do conhecimento e possibilitando o aprimoramento contínuo da bancada didática, bem como a continuidade de estudos acadêmicos relacionados ao tema.

2.1 Equilíbrio de carga da estrutura

Segundo Hibbeler, R.C. (2010, p. 10):

“[...]em todos os casos essas forças são distribuídas pela área de contato entre os corpos. Se essa área for pequena em comparação com o total da área da superfície do corpo, então a força de superfície pode ser imaginada como uma única força concentrada, aplicada em um ponto do corpo[...]”.

Embora as forças de contato sejam distribuídas ao longo de determinada área, é comum representá-las como forças concentradas na análise estrutural, representá-las como forças concentradas, desde que a região de aplicação seja

relativamente pequena. Essa simplificação não compromete o equilíbrio estático do sistema, definido pela condição em que a soma das forças e dos momentos atuantes é igual a zero.

Dessa forma, as forças externas são equilibradas pelas forças internas resistentes e pelas reações de apoio, garantindo a estabilidade da estrutura.

Considerando a necessidade de simplificação da análise estrutural, adotaram-se critérios baseados na Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6120 ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019, que permite a utilização de valores reduzidos de ações variáveis, desde que devidamente justificados.

Assim, para fins de análise, a distribuição de carga aplicada à estrutura foi representada como uma força concentrada, conforme apresentado nas Equações 1, 2 e 3.

(1)

$$p = m \cdot g$$

Onde:

p - peso (N)

m - massa (Kg)

g - aceleração da gravidade (m/s^2)

Conforme ilustrado na Figura 8 que representa o diagrama de corpo livre apresenta-se a Equação 2 sobre as forças atuantes.

(2)

$$F_x = 0 \quad M = 0 \quad F_{y=0}$$

Onde:

$\sum M$ - Somatório dos momentos (N.m)

$\sum F$ - Somatório das forças (N)

2.1.1 Momento fletor máximo

Em uma viga simplesmente apoiada com carga concentrada no centro, a aplicação de cargas transversais provoca sua flexão. Esse efeito gera tensões internas na seção transversal, caracterizadas por compressão e tração.

Diante disso, as fibras superiores da viga tendem a ficar comprimidas, enquanto as fibras inferiores são tracionadas, podendo ocorrer o inverso conforme o sentido da solicitação. Na Equação 3 apresenta-se o momento fletor máximo.

(3)

$$M_{\max} = \frac{P \cdot L}{4}$$

Onde:

M_{max} - Momento fletor máximo na viga, que ocorre no ponto de aplicação da carga concentrada (*N.m*)

P - Intensidade da carga concentrada aplicada no meio do vão da viga (*N*)

L - Comprimento total da viga entre os apoios (*m*)

2.2 Máquinas de fluxo

A aplicação dos estudos de Mecânica dos Fluidos e termodinâmica possui grande relevância no curso de Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado, enquanto a essa estuda o comportamento dos fluidos em repouso e em movimento, esse a transferência de calor e energia em sistemas térmicos.

De acordo com Çengel e Cimbala (2007), a Mecânica dos Fluidos estuda o comportamento de líquidos e gases, considerando as leis de conservação de massa, momento e energia aplicadas aos escoamentos.

Diante disso, o estudo do comportamento dos fluidos está diretamente relacionado à aplicação dos princípios de conservação de massa e quantidade de movimento, fundamentais para a análise do escoamento. Por sua vez, a termodinâmica baseia-se na primeira e na segunda leis, que descrevem as relações entre calor, trabalho, energia e entropia.

Conforme Coelho (2016), a Mecânica dos Fluidos e a termodinâmica são tratadas de forma integrada na engenharia, especialmente na análise de volumes de controle, envolvendo conservação de massa e energia, bem como transferência de calor e trabalho.

Os conceitos apresentados são fundamentais para a compreensão dos sistemas de escoamento, com base nisso o trabalho enfatiza a análise do comportamento dos fluidos e o comportamento da curva característica.

Corroborando com essa abordagem, Coelho (2016), afirma que a integração entre Mecânica dos Fluidos e termodinâmica permite uma análise mais completa dos sistemas térmicos e hidráulicos.

2.3 Comportamento dos fluidos incompressíveis

Segundo Brunetti (2008), do ponto de vista do observador, o corpo pode ser considerado em repouso enquanto o fluido encontra-se em movimento, evidenciando a importância do referencial na análise dos fenômenos.

A interpretação do comportamento dos fluidos, seja em repouso ou em movimento, depende do referencial adotado, uma vez que o movimento é relativo ao ponto de observação.

Os fluidos são substâncias que se alteram continuamente quando submetidas a tensões de cisalhamento, caracterizando o escoamento. Podem ser classificados em fluidos incompressíveis, como os líquidos, e fluidos compressíveis, como gases e vapores. Neste trabalho, considera-se o fluido água, classificado como incompressível.

Entre as principais propriedades dos fluidos, destacam-se a viscosidade, a massa específica e o peso específico.

- A viscosidade representa a resistência do fluido ao escoamento e depende principalmente da temperatura. Nos líquidos, a viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura. Em fluidos newtonianos, essa propriedade permanece constante, resultando em um escoamento previsível.

- A massa específica é definida como a razão entre a massa e o volume de uma substância, sendo influenciada pela temperatura e pela pressão.

- O peso específico corresponde à razão entre o peso e o volume do fluido, podendo ser expresso pela relação $\gamma = \rho \cdot g$, em que ρ é a massa específica e g é a aceleração da gravidade.

A classificação das máquinas de fluxo baseia-se em parâmetros como massa específica, energia e trajetória do fluido.

O desempenho dessas máquinas é caracterizado por grandezas como vazão, altura manométrica total, potência, rendimento, diâmetro do rotor e velocidade de operação.

2.4 Bombas hidráulicas

A função primária de uma bomba hidráulica é converter a energia fornecida por uma fonte motriz, como um motor elétrico ou a combustão, em energia hidráulica. Essa conversão possibilita o escoamento do fluido, garantindo a vazão necessária e a pressão requerida para o funcionamento do sistema.

O contexto apresentado enfatiza que a bomba hidráulica é responsável por manter a vazão do sistema e vencer as perdas de carga associadas à resistência ao escoamento nas tubulações.

De acordo com Lopes (2007), a função de uma bomba hidráulica consiste em converter a energia mecânica fornecida por um motor em energia hidráulica, disponibilizando vazão e pressão suficientes para superar as resistências do sistema.

2.5 Classificação das bombas hidráulicas

As bombas podem ser classificadas de acordo com o tipo de deslocamento em dois grupos principais: bombas de deslocamento positivo e bombas de deslocamento não positivo.

De acordo com Lopes (2007, p. 28), as bombas de deslocamento positivo são bombas hidráulicas de deslocamento positivo e motores hidráulicos, possuindo vedação mecânica que reduz o vazamento interno e proporciona maior eficiência no bombeamento do fluido.

Essas bombas operam com fluxo pulsante e possuem elementos de vedação que permitem o deslocamento de volumes definidos de fluido, sendo capazes de atingir pressões elevadas. São comumente utilizadas em sistemas que exigem controle preciso de vazão, como em atuadores hidráulicos, podendo gerar movimentos lineares, por meio de cilindros, ou rotativos, por meio de motores hidráulicos. Entre os principais tipos, destacam-se as bombas alternativas, de diafragma e rotativas.

Por outro lado, as bombas de deslocamento não positivo, segundo Lopes (2007, p. 33) são bombas normalmente utilizadas nas instalações hidráulicas para o transporte de fluidos. Diante disso, a importância de a vazão aumentar e reduzir a pressão em relação às bombas de deslocamento positivo.

Essas bombas também são conhecidas como bombas dinâmicas, operam com fluxo contínuo e são amplamente empregadas no transporte de fluidos em sistemas de escoamento. Nesse grupo, incluem-se as bombas centrífugas, axiais e turbobombas, utilizadas principalmente para transferência de fluidos entre reservatórios e em redes de tubulações.

2.6 Funcionamento da bomba hidráulica

Conforme Macintyre (1997), a bomba centrífuga requer um procedimento inicial denominado escorvamento, que consiste no preenchimento prévio do corpo da bomba e da tubulação de sucção com o líquido a ser bombeado. Esse procedimento é necessário devido às folgas existentes entre o rotor, o coletor e os demais componentes internos da bomba, as quais dificultam a expulsão do ar presente no sistema de sucção.

Dessa maneira, o escorvamento cria um diferencial de pressão que permite à pressão atmosférica atuar sobre o líquido no reservatório de sucção, preenchendo o espaço anteriormente ocupado pelo ar e possibilitando o funcionamento adequado da bomba. Assim, salvo em casos de soluções construtivas específicas, as bombas centrífugas não são autoescorvantes.

Após o acionamento do rotor, o líquido contido nos canais formados pelas pás passa a sofrer a ação da força centrífuga. Esse fenômeno provoca o aumento da pressão na periferia do rotor e, simultaneamente, a redução da pressão em sua região central. Como consequência, o líquido é impulsionado em direção à saída da bomba, estabelecendo um gradiente hidráulico entre a sucção e o recalque em razão da diferença de pressões existente entre essas regiões. Segundo Macintyre (1997), esse diferencial de pressão é responsável pelo deslocamento contínuo do fluido no interior da bomba.

Em decorrência desse diferencial de pressão, a pressão na entrada do rotor torna-se inferior à pressão atuante no reservatório de captação, permitindo que o líquido seja conduzido pelo tubo de sucção até o interior da bomba. Paralelamente, a pressão desenvolvida na descarga da bomba torna-se superior à pressão estática existente no tubo de recalque, forçando o líquido a escoar para níveis mais elevados ou regiões submetidas a maiores pressões, conforme apresentado por (Macintyre, 1997).

Desse modo, estabelece-se um escoamento contínuo do líquido entre o reservatório inferior e o reservatório superior, passando pelo tubo de sucção, rotor, difusor e tubo de recalque. Durante a passagem pelo rotor, ocorre a conversão da energia mecânica fornecida pelo eixo em energia cinética e energia de pressão, formas pelas quais a energia é transferida ao fluido. A denominação “centrífuga” atribuída a esse tipo de bomba decorre do fato de a força centrífuga ser responsável pela maior parcela de energia transmitida ao líquido durante seu escoamento através da bomba, de acordo com (Macintyre, 1997).

2.7 Diâmetro de projeto

O diâmetro de projeto ou ótimo de uma tubulação corresponde ao diâmetro que permite o transporte da vazão de projeto com velocidades adequadas e perdas de carga compatíveis com as condições operacionais do sistema. Sua determinação busca conciliar aspectos hidráulicos e econômicos, evitando tanto o superdimensionamento quanto o subdimensionamento da instalação.

Segundo Macintyre (1997), a seleção do diâmetro da tubulação deve considerar simultaneamente a vazão requerida, a velocidade do escoamento e as perdas de carga admissíveis, de modo a garantir a eficiência hidráulica e a viabilidade econômica do sistema. Nesse contexto, a determinação da velocidade do fluido constitui uma etapa fundamental do dimensionamento, uma vez que influencia diretamente as perdas de carga e o desempenho operacional da instalação. Para esse cálculo, foi utilizada a Equação 4, que relaciona a vazão com a área da seção transversal da tubulação.

(4)

$$Q = v \cdot A$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{Q}{\left(\pi \frac{d^2}{4}\right)}$$

Onde:

Q - Vazão volumétrica (m³/s).

v - Velocidade do escoamento (m/s).

A - Área (m²).

dh - Diâmetro hidráulico (m).

π - Pi

2.8 Perdas de carga

Conforme Brunetti (2008), a perda de carga corresponde à redução da energia mecânica do fluido ao longo do escoamento, ocasionada principalmente pelo atrito e pelas turbulências internas, resultando na diminuição da pressão disponível no sistema.

Observa-se que a abordagem de Brunetti está alinhada com a literatura clássica da Mecânica dos Fluidos, reforçando o entendimento de que a energia mecânica dissipada no escoamento é convertida predominantemente em calor.

Entretanto, embora Brunetti descreva adequadamente a perda de carga como resultado do atrito e das turbulências, autores como Çengel e Cimbala (2007) destacam um aspecto adicional que a perda de carga também pode ser interpretada como um aumento do grau de desordem do sistema, associado ao conceito de entropia, evidenciando o caráter termodinâmico do fenômeno.

Esse enfoque amplia a interpretação proposta por Brunetti, aproximando-a dos princípios estabelecidos pela segunda lei da termodinâmica.

Em consonância com essa definição, autores como White (2011) e Munson et al. (2004) apresentam interpretações semelhantes, destacando que a perda de carga não representa uma perda de energia no sentido físico, mas sim sua transformação em energia térmica não aproveitável.

2.8.1 Classificação das perdas de carga

De acordo com Brunetti (2008), as perdas de carga em escoamentos em condutos podem ser classificadas em dois tipos: perdas distribuídas (hf) e perdas singulares (hs). Essas perdas representam a dissipação de energia ao longo do escoamento e são geralmente expressas em termos de energia por unidade de peso do fluido.

2.8.2 Perda de carga distribuída

A perda de carga distribuída (hf) ocorre em seções de tubos reto onde o fluido esco a uma dada velocidade.

Devido ao atrito entre as partículas do fluido e a parede interna da tubulação que apresentam asperezas, perde-se energia durante seu escoamento, essa perda de carga torna-se significativa quando há trechos longos de tubos.

Isso vai ao encontro com a prática, pois quanto maior for o comprimento da tubulação de uma instalação, maior será a perda de carga resultante do atrito contínuo do fluido com a tubulação. Na Equação 5, demonstra-se as variáveis abordadas na perda de carga distribuída.

(5)

$$h_f = f \cdot \frac{L v^2}{d h 2g}$$

Onde:

h_f - Perda de carga distribuída no trecho (m).

f - Coeficiente de perda de carga (adimensional).

L - Comprimento do trecho (m).

v - Velocidade do escoamento (m/s).

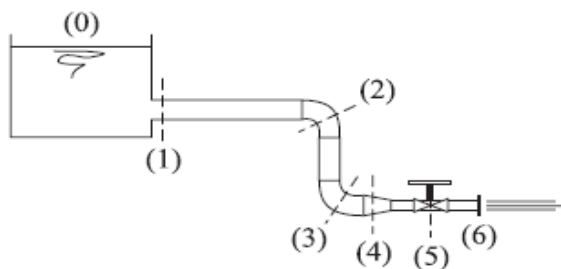
d - Diâmetro da tubulação (m).

g - Aceleração da gravidade (m/s^2).

2.8.3 Perda de carga singulares

As perdas de carga localizadas (h_s), também denominadas perdas singulares, ocorrem em pontos específicos da instalação onde há mudanças bruscas na geometria ou na direção do escoamento do fluido. Na Figura 1 apresenta-se a representação de perdas de carga singulares.

Figura 1 - Representação de perdas de carga singulares.



Fonte: Adaptado Brunetti, (2008, 2. ed.).

Essas situações estão associadas a elementos como válvulas, curvas, reduções, ampliações, bem como entradas e saídas de reservatórios.

Essas perdas podem apresentar valores significativos, mesmo em trechos curtos da instalação, especialmente em sistemas com grande quantidade de acessórios.

Em projetos hidráulicos, observa-se que o aumento no número de conexões e dispositivos, como curvas e válvulas, contribui diretamente para o acréscimo da perda de carga total, tornando-a relevante mesmo em instalações de pequena extensão.

Segundo Brunetti (2008), as perdas de carga localizadas podem ser determinadas por dois métodos: o método do coeficiente de perda (K) e o método dos comprimentos equivalentes.

No método do coeficiente de perda, cada acessório apresenta um valor específico de coeficiente (K), obtido experimentalmente e apresentado em tabelas. Na Equação 6 apresenta-se o cálculo da perda de carga localizada.

(6)

$$h_s = k_s \frac{v^2}{2g}$$

Onde:

h_s - Perda de carga singular (m).

k_s - Coeficiente de forma adimensional.

v - Velocidade do escoamento (m/s).

g - Aceleração da gravidade (m/s^2).

Alguns exemplos de acessórios hidráulicos, bem como seus respectivos coeficientes de perda, estão apresentados na Tabela A.1 no Anexo A.

O método dos comprimentos equivalentes consiste em representar a perda de carga causada por um acessório como um comprimento adicional de tubulação retilínea, equivalente àquele que produziria a mesma perda de energia.

Assim, cada singularidade é associada a um comprimento equivalente, que deve ser incorporado aos cálculos hidráulicos, conforme demonstrado na Equação 7.

(7)

$$h_s = f \cdot \frac{L_{eq}}{d_h} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Onde:

h_s - Perda de carga singular no trecho (m).

f - Coeficiente de perda de carga (adimensional).

L_{eq} - Comprimento equivalente da singularidade (m).

v^2 - Velocidade do escoamento (m/s).

d_h - Diâmetro hidráulico (m).

g - Aceleração da gravidade (m/s^2).

Alguns valores de comprimentos equivalentes para as singularidades mais frequentes estão apresentados na Tabela A.2 no Anexo A.

2.9 Equação da continuidade

A equação da continuidade constitui um dos princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos, sendo baseada na lei da conservação da massa. Em escoamentos em regime permanente, nos quais as propriedades do fluido não variam com o tempo, essa equação garante a constância da massa ao longo do sistema.

Diante disso, a quantidade de fluido que entra em um volume de controle é igual à quantidade que dele sai, assegurando a continuidade do escoamento.

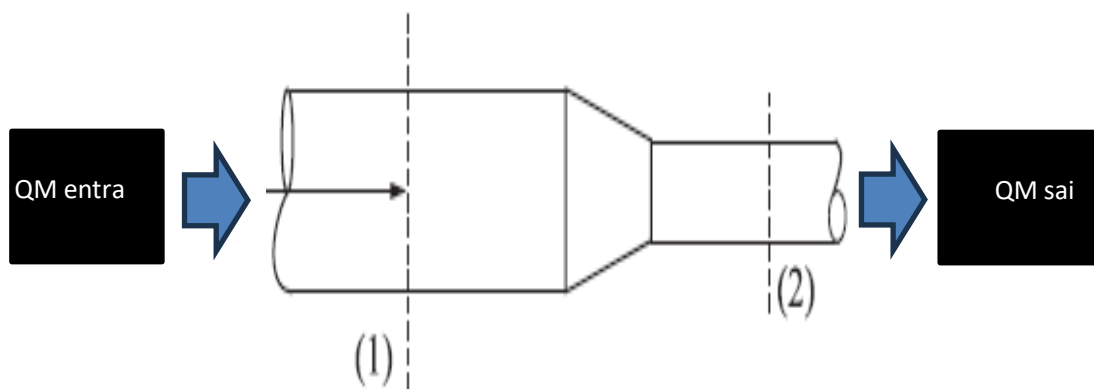
Conforme Brunetti, (2008. p.74), esclarece que para que a hipótese de regime permanente seja verdadeira, a massa de fluido que flui por uma seção de um tubo de corrente deve ser idêntica àquela que o abandona por outra seção qualquer. Pode-se, então, fazer um balanço das massas ou vazões em massa entre seções de entrada e saída de um certo escoamento. Com base no fato de que a energia não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada, foi possível construir uma equação que permitiu realizar um balanço das energias, da mesma forma como foi feito para as massas, por meio da equação da continuidade.

Essa afirmação está em consonância com os fundamentos da Mecânica dos Fluidos, uma vez que a equação da continuidade expressa a conservação da massa no escoamento. Observa-se que, em sistemas com fluidos

incompressíveis, a velocidade do escoamento é inversamente proporcional à área da seção transversal da tubulação.

Assim sendo, a redução do diâmetro da tubulação implica no aumento da velocidade do fluido, mantendo-se constante a vazão mássica ao longo do escoamento. Na Figura 2 demonstra-se a aplicação da equação da continuidade.

Figura 2 - Equação da continuidade.



Fonte: Adaptado Brunetti, (2008, 2. ed.).

Conforme apresentado na equação 8, é possível determinar as variáveis do escoamento para fluidos incompressíveis.

(8)

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Onde:

Q1 - Vazão no ponto 1 (m^3/s).

v1- Velocidade no ponto 1 (m/s).

A1 - Área no ponto 1 (m^2)

Q2- Vazão no ponto 2 (m^3/s).

v2 - Velocidade no ponto 2 (m/s).

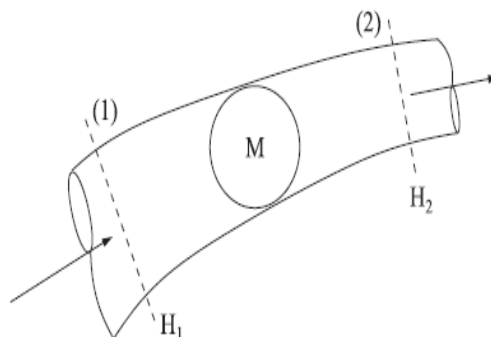
A2- Área no ponto 2 (m^2).

2.10 Equação da energia para um fluido real com a presença de máquina

Conforme Brunetti (2008), uma máquina pode ser definida como um dispositivo introduzido no escoamento com a finalidade de fornecer ou retirar

energia do fluido na forma de trabalho. A Figura 3 apresenta-se a equação da energia com presença de máquina.

Figura 3 – Equação da energia com presença de máquina



Fonte: Adaptado Brunetti, (2008, 2. ed.).

Em complemento, Stepanoff (1957) aborda o desempenho de bombas centrífugas, destacando que a altura manométrica corresponde à diferença entre as energias específicas totais nos pontos de sucção e de descarga da bomba.

Desse modo, observa-se que essa grandeza incorpora tanto os efeitos geométricos quanto as perdas energéticas associadas ao escoamento.

Observa-se que as abordagens de Brunetti (2008) e Stepanoff (1957) são complementares, apresentando coerência entre a interpretação contemporânea e a formulação clássica da Mecânica dos Fluidos.

Como forma de complementação, pode-se afirmar que a altura manométrica de uma bomba pode ser determinada por meio da aplicação da equação da energia, considerando a presença de uma máquina entre duas seções do escoamento.

Além disso, Lopes (2007) ressalta que, após a seleção de uma bomba, é necessário verificar a possibilidade de ocorrência de cavitação, a fim de garantir o adequado funcionamento do sistema.

Para evitar a ocorrência do fenômeno da cavitação, a pressão na entrada da bomba deve ser superior à pressão de vapor da água. Essa avaliação é realizada por meio da aplicação da equação da energia em sistemas hidráulicos dotados de turbomáquinas.

A determinação da pressão em pontos específicos da tubulação, da potência do equipamento e da altura manométrica permite realizar análises pontuais de uma instalação hidráulica, parâmetros estes fundamentais para o dimensionamento e a seleção do maquinário. Para isso, aplica-se a equação 9 da energia para o cálculo da pressão de entrada, posicionando-se os pontos de controle na entrada (H1) e na saída (H2) da bomba.

(9)

$$H1 + HB = H2 + hp1 - 2$$

$$z1 + \frac{v1^2}{2g} + \frac{P1}{\gamma} + HB = z2 + \frac{v2^2}{2g} + \frac{P2}{\gamma} + hp1 - 2$$

Onde:

H1 - Carga por unidade de peso no ponto 1 (m).

H2 - Carga por unidade de peso no ponto 2 (m).

HB - Carga por unidade de peso da bomba ou altura manométrica (m).

z1 - Carga potencial no ponto 1 (m).

$\frac{v1^2}{2g}$ - Carga da velocidade ou carga cinética no ponto 1 (m).

$\frac{P1}{\gamma}$ - Energia de pressão por unidade de peso no ponto 1 (m).

z2 - Carga potencial no ponto 2 (m).

$\frac{v2^2}{2g}$ - Carga da velocidade ou carga cinética no ponto 2 (m).

$\frac{P2}{\gamma}$ - Energia de pressão por unidade de peso no ponto 2 (m).

hp1 - 2 - Perda de carga do ponto 1 até o 2 (m).

Enquanto a equação geral da energia, conforme apresentada na Equação 9, representa o balanço completo das diferentes formas de energia presentes no escoamento de um fluido, sua formulação considera as energias potencial, cinética e de pressão, bem como a energia adicionada pela bomba e as perdas de carga existentes ao longo da tubulação. Posto isso, essa equação possibilita uma análise detalhada do comportamento hidráulico entre dois pontos de um sistema. Em termos teóricos, trata-se de uma adaptação da equação de Bernoulli para fluidos reais, uma vez que considera os efeitos dissipativos decorrentes do atrito e das singularidades hidráulicas.

Por outro lado, a equação da carga manométrica da bomba disposta na Equação 10, consiste em uma simplificação prática derivada da equação geral da energia. Nessa formulação, considera-se que a energia fornecida pela bomba é utilizada para vencer a carga estática de elevação e as perdas de carga totais do sistema. Diante disso, sua aplicação está diretamente relacionada ao dimensionamento e à seleção de bombas hidráulicas.

(10)

$$HB = H_{est} + H_{ptotal}$$

Onde:

HB - Carga manométrica da bomba (m).

H_{ptotal} - Perda de carga total (m).

H_{est} - Carga ou altura estática de elevação (m).

2.11 Número de Reynolds (Re)

O número de Reynolds é um parâmetro adimensional fundamental na Mecânica dos Fluidos, utilizado para determinar se o regime de escoamento é laminar ou turbulento. A classificação desse regime depende de três variáveis:

- Diâmetro hidráulico da conduta (m)
- Velocidade média do fluido (m/s)
- Viscosidade cinemática (m^2/s)

De acordo com Brunetti (2008, p. 166), o escoamento é caracterizado como laminar quando o número de Reynolds é inferior a 2.000. Esse regime apresenta um comportamento ordenado, no qual as partículas se movimentam em camadas paralelas sem que ocorra mistura ou troca de massa entre elas, condição geralmente associada a baixas velocidades.

Por outro lado, o escoamento é classificado como turbulento quando o número de Reynolds apresenta valores superiores a 2.400, regime este caracterizado pela desordem no movimento do fluido. Nesse cenário, ocorrem flutuações transversais de velocidade que promovem a mistura intensa e a movimentação aleatória das partículas, logo esse comportamento instável está associado, predominantemente, a escoamentos operando sob maiores velocidades.

A determinação do número de Reynolds é fundamental no dimensionamento hidráulico, visto que este parâmetro influencia diretamente o

fator de atrito e, conseqüentemente, as perdas de carga da instalação. Desse modo, uma maior velocidade do fluido intensifica a perda de energia do sistema. Na Equação 11 apresenta-se o número de Reynolds.

(11)

$$Re = \rho v \frac{dh}{\mu}$$

Onde:

Re - Número de Reynolds (adimensional).

ρ - Massa específica do fluido (kg/m^3).

dh - Diâmetro hidráulico da tubulação (m).

v - Velocidade do escoamento (m/s).

μ - Viscosidade dinâmica ($N.s/m^2$).

2.12 Rugosidade Uniforme/Absoluta

As tubulações utilizadas em escoamento apresentam irregularidades em sua superfície interna. Essas asperezas possuem formatos e alturas variadas, as quais impactam diretamente na perda de carga do sistema.

Conceitua Brunetti (2008, p. 168) que embora essas asperezas sejam geralmente distribuídas de forma aleatória, para fins de cálculo considera-se que possuam altura e disposição uniformes, representadas pelo parâmetro “ ϵ ”, conforme ilustrado na tabela de símbolos, denominado rugosidade uniforme. Entretanto, o que realmente impacta nas perdas de carga é a relação entre o diâmetro hidráulico e a rugosidade absoluta, definida como rugosidade relativa (dh/ϵ).

A influência da rugosidade absoluta no escoamento de fluidos em condutos forçados surgiu através do experimento de Johann Nikuradse que demonstrou que a rugosidade absoluta das tubulações influencia diretamente o fator de atrito e as perdas de carga no escoamento turbulento, sendo essa influência relacionada ao número de Reynolds e à rugosidade relativa do conduto.

A rugosidade relativa, representada pela letra “ k ”, é um número adimensional que será utilizado para determinar o fator de atrito.

Na prática quando se trata de projetos de tubulações hidráulica, significa que condutos constituídos do mesmo material, mas com diâmetros diferentes,

podem apresentar perdas de carga diferentes devido à variação da rugosidade relativa. A Equação 12 apresenta a rugosidade relativa.

(12)

$$k = \frac{dh}{\varepsilon}$$

Onde:

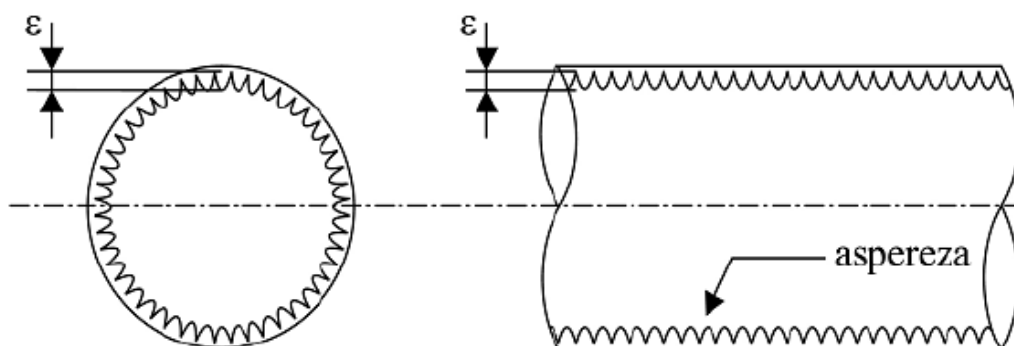
k - Rugosidade relativa (adimensional).

dh - Diâmetro hidráulico (*m*).

ε - Rugosidade absoluta (*m*).

Os valores da rugosidade equivalente absoluta de alguns materiais encontram-se na Tabela A.3 no Anexo A, enquanto a representação da rugosidade na tubulação é apresentada conforme a Figura 4.

Figura 4 - Representação da rugosidade em tubulações



Fonte: Adaptado Brunetti, (2008, 2. ed.).

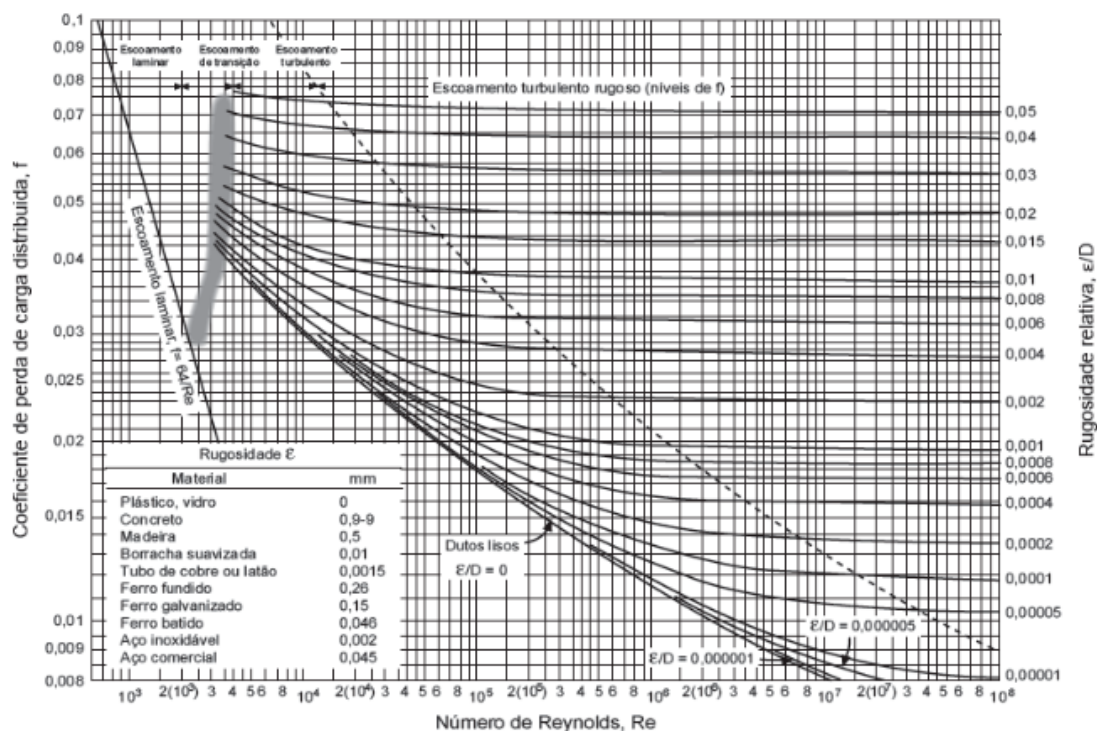
2.13 Fator de atrito

De acordo com Brunetti (2008, p.177), pode-se obter o valor de fator de atrito utilizando o Diagrama de Moody-Rouse. Este diagrama relaciona diversas características sobre o tipo de escoamento, número de Reynolds, rugosidade de diversos materiais, uma vez conhecendo os valores e cruzando as informações no gráfico, obtém-se o valor de fator de atrito.

O fator de atrito (*f*) é um número adimensional, utilizado para o cálculo das perdas de cargas distribuída e singulares, esse coeficiente depende do

número de Reynolds e da rugosidade. Na Figura 5 apresenta-se o diagrama de Moody-Rouse que é utilizado para a determinação do fator de atrito.

Figura 5- Diagrama de Moody Rouse



Fonte: Adaptado de IZOLA (2020).

2.14 Curva característica da bomba (CCB)

Conforme Brunetti (2008), a curva característica de uma bomba corresponde à relação entre a altura manométrica e a vazão, sendo fundamental para a determinação do ponto de operação de um sistema hidráulico.

Esse conceito é corroborado por autores clássicos, como White (2011) e Munson et al. (2004), os quais descrevem a mesma relação entre altura e vazão, destacando a importância da interseção entre a curva da bomba e a curva do sistema para o correto dimensionamento das instalações hidráulicas. Entretanto, autores como Stepanoff (1957) e Gülich (2010) apresentam uma abordagem mais abrangente, ao considerar que a análise restrita à curva característica ($H \times Q$) é insuficiente para a avaliação completa do desempenho da bomba.

Esses autores recomendam a inclusão de outras curvas operacionais, como as de rendimento, potência absorvida e NPSH requerido (Net Positive

Suction Head). Esse parâmetro representa a carga disponível na sucção necessária para evitar a ocorrência de cavitação na bomba.

A definição proposta por Brunetti mantém-se válida, porém pode ser complementada por abordagens mais abrangentes. Essas abordagens ampliam o escopo da análise ao incluir aspectos relacionados à eficiência energética e à segurança operacional.

A curva característica representa a energia por unidade de peso que deve ser fornecida ao fluido para que o escoamento ocorra em regime permanente ao longo da instalação.

No dimensionamento de sistemas hidráulicos, é essencial compreender que a seleção da bomba está diretamente relacionada às necessidades energéticas da instalação. Desse modo, a bomba não deve ser analisada de forma isolada, mas como um elemento responsável por atender às condições operacionais previamente definidas pelo sistema.

Para a determinação da curva da instalação, aplica-se a equação da energia, também conhecida como equação de Bernoulli com inclusão das perdas de carga, entre dois pontos representativos do sistema, conforme apresentado na Equação 5.

2.14.1 Tipos de curvas características

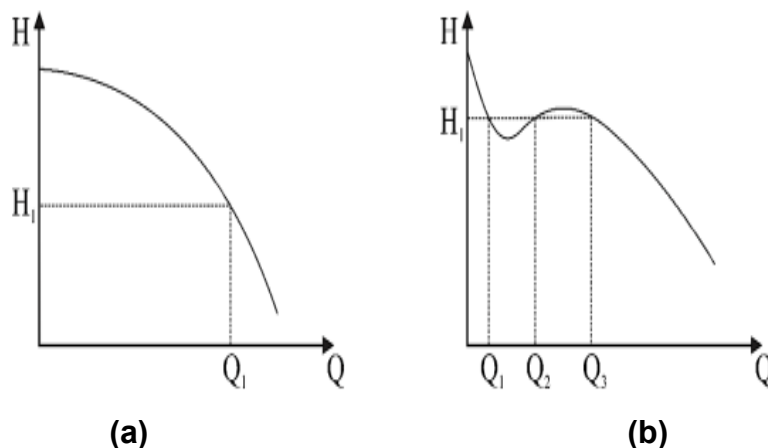
De acordo com Costa et al. (2001), as curvas características das bombas podem ser divididas em estáveis e instáveis.

As curvas estáveis caracterizam-se pela existência de um único valor de vazão (Q) para cada valor de altura manométrica (H_m). Nesse caso, a curva característica apresenta comportamento monotônico e contínuo, sem inflexões significativas, sendo geralmente decrescente. Assim, observa-se que, à medida que a vazão aumenta, a altura manométrica diminui de forma previsível e uniforme.

Por outro lado, as curvas instáveis apresentam regiões nas quais um mesmo valor de altura manométrica (H_m) pode corresponder a dois ou mais valores de vazão (Q). Esse comportamento ocorre devido à presença de inflexões ou trechos não monotônicos na curva característica da bomba. Desse modo, diferentes condições de operação podem ser verificadas para uma mesma H_m , indicando possíveis instabilidades no funcionamento do sistema

hidráulico. Na Figura 6 demonstram-se as curvas características estável e instável.

Figura 6 - Curva característica: (a) Estável; (b) Instável

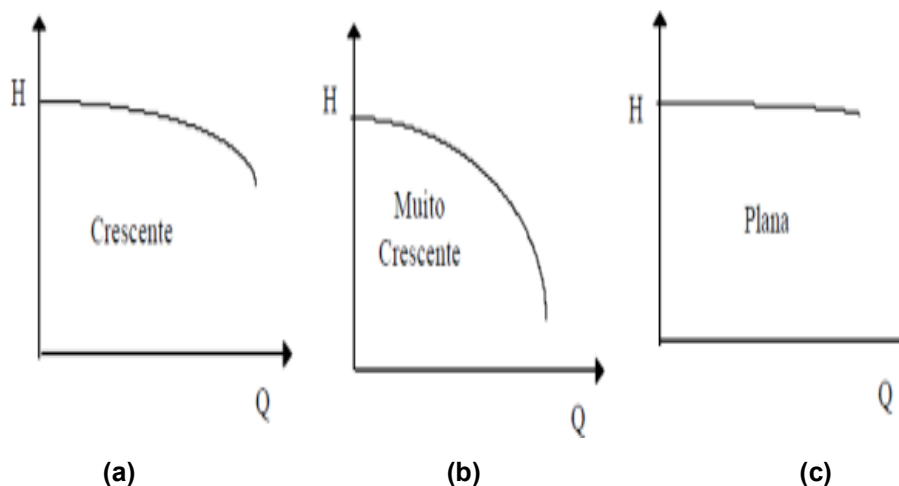


Fonte: Adaptado de Costa et al, (2001)

Segundo Costa et al. (2001), as curvas características estáveis das bombas podem ser classificadas em curvas crescentes, muito crescentes e planas, conforme segue:

- As curvas crescentes caracterizam-se pelo aumento contínuo da altura de elevação à medida que ocorre a diminuição da vazão, apresentando comportamento estável durante a operação da bomba, conforme apresentado na Figura 6a.
- As curvas muito crescentes também apresentam comportamento estável, porém possuem elevada variação da altura de elevação para pequenas alterações de vazão. Esse tipo de curva é frequentemente observado em bombas com reduzido número de pás, pequenos ângulos de saída e rotores de menor espessura. Além disso, bombas de múltiplos estágios tendem a apresentar curvas com características semelhantes, conforme representado na Figura 6b.
- Já as curvas planas distinguem-se pela pequena variação da altura de elevação em função da alteração da vazão. Bombas que possuem elevado número de pás, grandes ângulos de saída e rotores mais espessos normalmente apresentam esse comportamento. Da mesma forma, associações de bombas em paralelo também tendem a gerar curvas com característica plana conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Tipos de curvas estáveis: (a) Crescente; (b) Muito crescente e (c) Plana



Fonte: Adaptado Costa et al. (2001).

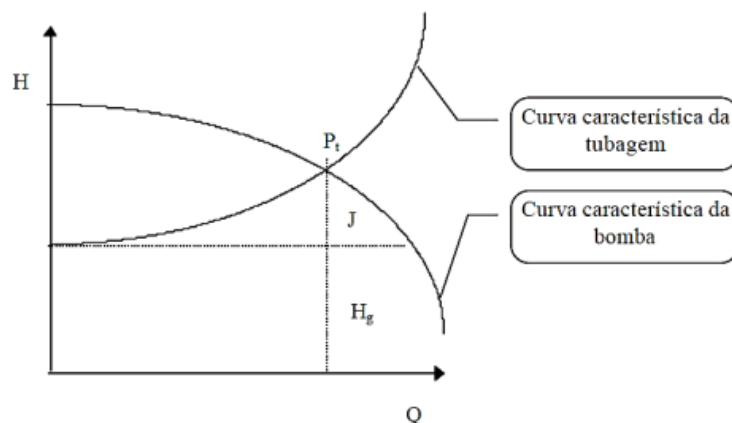
2.14.2 Ponto inicial de operação

Nas bombas centrífugas com curvas do tipo crescente, a altura manométrica máxima é atingida na condição de vazão nula, conhecida como ponto de *shut-off*. Nessa situação, a bomba permanece operando em sua rotação nominal, porém com as válvulas da tubulação totalmente fechadas, impedindo a circulação do fluido no sistema.

Como não há escoamento de líquido, toda a energia fornecida pelo motor é convertida em pressão estática no interior da bomba, resultando no aumento da altura manométrica desenvolvida. Dessa maneira, estabelece-se a máxima pressão interna do sistema, uma vez que não ocorre recirculação do fluido através da tubulação ou da própria bomba.

Além disso, mesmo sem vazão, o conjunto motobomba continua exigindo torque para vencer as resistências internas do fluido e dos componentes mecânicos, aumentando a solicitação sobre o motor e o sistema de acionamento. A magnitude da altura manométrica no ponto de *shut-off* está diretamente relacionada às características construtivas da bomba, como número de pás, geometria do rotor e configuração hidráulica do sistema. Assim, bombas projetadas para operar com elevadas alturas manométricas podem apresentar valores consideráveis nessa condição operacional, Costa et al., (2001). De acordo com a Figura 8, apresenta-se o ponto de operação de uma bomba centrífuga.

Figura 8 - Ponto de operação de uma bomba centrífuga



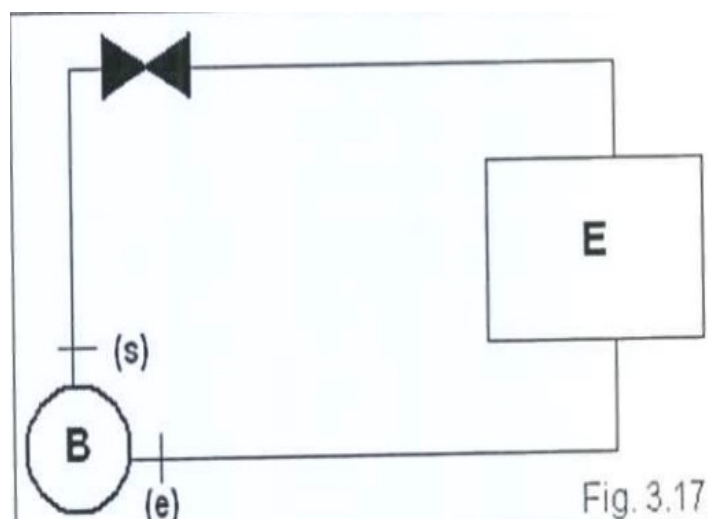
Fonte: Adaptado Costa et al. (2001).

O ponto de trabalho, também denominado ponto de operação da bomba centrífuga, corresponde à interseção entre a curva característica da bomba e a curva característica da tubulação do sistema. Nesse ponto, a vazão de operação (Q_t) é obtida com a válvula totalmente aberta. Durante o funcionamento, a vazão varia de zero até atingir Q_t , enquanto a altura manométrica evolui desde a altura geométrica (H_g) até o valor correspondente às condições normais de operação da bomba, Costa et al., (2001).

2.15 Circuito hidráulico fechado

É um sistema que estuda o comportamento do escoamento de fluidos em um ambiente estanque sem interferência da atmosfera. Nesse tipo de sistema, o fluido circula continuamente em um circuito fechado, permitindo maior controle operacional, redução de desperdícios e melhor estabilidade durante os ensaios experimentais.

Segundo Lopes (2007, p. 58), “[...] a bomba alimenta uma linha que acaba terminando na própria entrada da bomba”. Na Figura 9 apresenta-se um circuito fechado.

Figura 9 – Circuito hidráulico fechado

Fonte: Adaptado LOPES, (2007, p. 58)

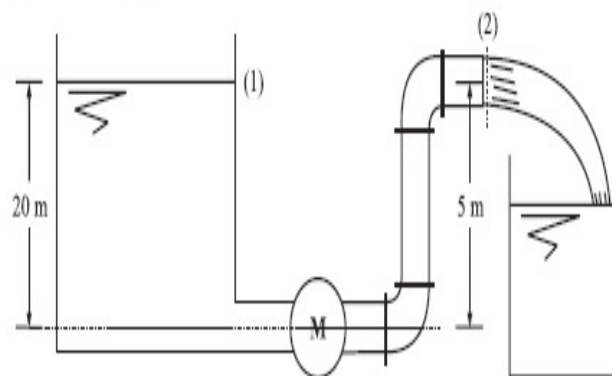
Nessa situação, a altura estática (H_{est}) é igual a zero, de modo que a carga manométrica do sistema é definida, conforme a Equação 12.

O circuito hidráulico fechado pode ser composto por um reservatório de água ou um trocador de calor, acrescidos de válvulas e acessórios hidráulicos, porém sem a interferência da pressão atmosférica no sistema. Nesse circuito, a bomba centrífuga promove o escoamento do fluido através da tubulação, permitindo que a água retorne continuamente ao reservatório e à seção de sucção da própria bomba, caracterizando um sistema de recirculação hidráulica (Lopes, 2007).

2.16 Sistema hidráulico aberto

Segundo Brunetti (2008, p. 167) para um reservatório aberto à atmosfera, as velocidades nas superfícies livres são desprezíveis ($v=0$) e as pressões manométricas nesse ponto são nulas ($p=0$). Na Figura 10 demonstra-se um circuito aberto.

Figura 10 – Circuito hidráulico aberto



Fonte: Adaptado Brunetti, (2008, 2. ed.).

Para White (2011, p. 705), "Um escoamento em canal aberto representa um escoamento com uma superfície livre em contato com a atmosfera."

Embora a bancada didática hidráulica, apresentada na Figura 14, esteja parcialmente aberta, ela dispõe o mesmo princípio físico fundamental quando utiliza um reservatório aberto à atmosfera.

White (2011) afirma que "a pressão pode ser considerada constante ao longo da superfície livre".

Essa condição é extremamente importante para uma bancada experimental, pois permite simplificar a aplicação da Equação de Bernoulli e das equações de conservação de massa e energia. Nesse sistema, a pressão atmosférica na superfície do reservatório torna-se uma condição de contorno conhecida, facilitando a análise do comportamento hidráulico do sistema.

Outro aspecto relevante apresentado por White (2011) "O balanço de forças fica restrito à gravidade e ao atrito".

Pode-se concluir que o escoamento em sistemas com superfície livre é governado principalmente pela ação da gravidade, que fornece a energia necessária para o deslocamento do fluido, e pelas perdas de carga decorrentes do atrito ao longo do escoamento. Nesse contexto, a carga estática, associada à diferença de cotas e às condições de pressão do sistema, representa a parcela de energia independente da vazão, enquanto as perdas de carga variam em função das condições de escoamento. Dessa forma, o comportamento hidráulico

do sistema resulta do equilíbrio entre a energia disponível e as perdas por atrito, em concordância com os princípios apresentados por White (2011).

Aplicando esse conceito à bancada didática, a bomba hidráulica fornece energia ao fluido, enquanto as tubulações, válvulas e acessórios provocam perdas de carga.

O reservatório aberto funciona como referência hidráulica do sistema, permitindo observar experimentalmente fenômenos, dentre os quais se destacam:

- Perdas de carga distribuídas e localizadas;
- Medição de vazão;
- Aplicação da equação de Bernoulli;
- Influência do atrito no escoamento;
- Regime de escoamento em tubulações.

Além disso, White (2011) ressalta que a continuidade para escoamentos permanentes pode ser expressa na seguinte premissa: "A equação da continuidade para escoamento permanente reduz-se à vazão volumétrica Q constante ao longo do canal."

2.17 Teorema fundamental da hidrostática (Lei de Stevin)

De acordo com Brunetti (2008), a estática dos fluidos estabelece que as pressões em pontos de uma mesma linha horizontal em um fluido homogêneo contínuo são idênticas. Ao analisar o barômetro idealizado por Torricelli sob a ótica do Teorema Fundamental da Hidrostática, a pressão efetiva no topo da coluna líquida é nula devido ao vácuo formado. Desse modo, a altura (h) atingida pelo fluido torna-se diretamente proporcional à pressão atmosférica absoluta do ambiente, dependendo unicamente do peso específico (γ) do fluido manométrico utilizado." (13)

$$h = \frac{P_{atm}}{\rho \cdot g}$$

Onde:

h - Altura (m)

P_{atm} - Pressão atmosférica (Pa)

ρ - Densidade (kg/m^3)

g - Aceleração da gravidade (m/s^2).

2.18 Cavitação

A cavitação é um fenômeno que ocorre quando a pressão local de um líquido se torna inferior à sua pressão de vapor para determinada temperatura, ocasionando a formação de bolhas de vapor no escoamento. Segundo Brunetti (2008), essas bolhas são transportadas para regiões de maior pressão, onde sofrem implosão, gerando elevadas pressões localizadas capazes de provocar erosão mecânica nas superfícies sólidas em contato com o fluido.

Para Brunetti (2008), os principais efeitos da cavitação em sistemas de bombeamento incluem o surgimento de ruídos característicos, vibrações mecânicas, redução do rendimento hidráulico e desgaste progressivo dos componentes internos da bomba, especialmente na região de entrada das pás do rotor. Em casos severos, o fenômeno pode causar a formação de pequenas erosões e comprometer a vida útil do equipamento.

Para prevenir a ocorrência da cavitação, Brunetti (2008) ressalta a necessidade de manter a pressão na sucção da bomba acima da pressão de vapor do fluido, condição verificada por meio da relação entre o NPSH Disponível (NPSH_d) da instalação e o NPSH Requerido (NPSH_r) pelo equipamento.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 Métodos

A metodologia experimental empregada neste trabalho tem como base a produção de conhecimento obtida por meio de medições organizadas em uma sequência lógica de etapas, permitindo uma compreensão mais clara dos fenômenos analisados. As etapas desenvolvidas são descritas a seguir:

3.1.1 Realização de pesquisas em livros, artigos científicos, normas técnicas e meios digitais sobre Mecânica dos Fluidos, Resistência dos Materiais, normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e demais conteúdos necessários ao desenvolvimento do trabalho.

3.1.2 Desenvolvimento do sistema hidráulico da bancada didática, incluindo a elaboração de esquemas detalhados e a seleção dos componentes utilizados.

3.1.3 Realização de experimentos para a determinação da curva característica da bomba centrífuga utilizada na bancada didática.

3.1.4 Comparação dos resultados experimentais com os cálculos teóricos, visando à análise do comportamento hidráulico do sistema.

3.1.5 Avaliação da aplicação didática da bancada experimental, bem como apresentação de sugestões de melhorias para futuras implementações.

3.2 Materiais

3.2.1 Os materiais utilizados na construção da bancada: Aço galvanizado metalon (50,0 x 30,0 x 2,00) mm com elasticidade 210 GPa; limite de escoamento 235 MPa; resistência à tração máxima 360 - 510 Mpa e densidade do aço 7850 kg/m³.

3.2.2 A vista superior do projeto da bancada, elaborada em AutoCAD e apresentada na Figura B.1 no Apêndice B, permite visualizar de forma clara a disposição espacial dos componentes que compõem o sistema hidráulico. Essa representação gráfica facilita a compreensão do arranjo físico da bancada didática, bem como a localização e a interligação de seus principais elementos.

3.2.3 A bomba utilizada neste projeto é do tipo centrífuga, modelo BC-98, da fabricante Schneider, conforme Figura A.2. Trata-se de uma motobomba de superfície, monoestágio, amplamente empregada no bombeamento de água limpa, com aplicação em sistemas que requerem vazões moderadas e alturas manométricas compatíveis com usos residenciais e de pequeno porte.

Descrição técnica da bomba hidráulica modelo BC-98:

- Potência: $\frac{1}{2}$ cv (0.5 HP)
- Tensão: 220 (monofásico)
- Frequência: 60Hz
- Fase: Monofásica
- Bocais (sucção/recalque): $\frac{3}{4}$ " (rosca BSP)
- Vazão Máxima: 5.500 L/h (2 m. c. a) – metros de coluna d'água.
- Vazão mínima: 1.100 L/h (19m. c. a) – metros de coluna d'água.
- Altura máxima (recalque): (19 m. c. a) – metros de coluna d'água.
- Altura máxima (sucção): (8m. c. a) – metros de coluna d'água.
- Temperatura máxima de líquido: 55° C
- Material do caracol: Ferro fundido GG – 20
- Material do rotor: Noryl (com 30% de fibra de vidro)
- Motor: WEG, IP-21, 2 polos, com flange incorporada, proteção térmica e capacitor permanente.

3.2.4 Para a realização das medições experimentais, foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Dois manômetros da marca TUB, utilizados para a medição da pressão do fluido, com escala graduada de 0 a 60 em metros de coluna d'água (m. c. a.);
- Dois vacuômetros da marca TUB, utilizados para a medição da pressão abaixo da atmosférica (vácuo), com escala graduada de 0 a -760 de mmHg, conforme especificado pelo fabricante;
- Um rotâmetro da marca Blaster, empregado para a medição da vazão volumétrica, com faixa de operação de 0 a 12 m³/h e resolução de 1 m³/h.

4 PROJETO

A bancada didática constitui um recurso educacional capaz de transformar a teoria em prática, tornando o processo de aprendizagem mais eficiente e interativo em relação aos conceitos estudados. Sua aplicação pedagógica favorece uma maior compreensão dos conteúdos, proporcionando aos usuários uma percepção mais uniforme, sobretudo nos estudos de Mecânica dos Fluidos, especialmente, em relação ao objeto de estudo, o levantamento da curva característica da bomba.

A estrutura da bancada foi confeccionada em perfil metálico, garantindo estabilidade e segurança ao sistema, além disso, o projeto estrutural foi dimensionado para suportar cargas previstas, tais como, bombas hidráulicas, reservatório, instrumentos de medição, tubulações de PVC e demais componentes utilizados no conjunto experimental. O início da construção da bancada é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Início da construção da bancada



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A solda utilizada, MGM 13, consiste em um eletrodo revestido para soldagem elétrica, indicado para aços de baixo carbono, sendo compatível com o material metálico empregado na estrutura.

A composição do material é classificada como aço carbono comum S235, conforme a norma EN 10025-2, destinada aos aços estruturais não ligados. Na Tabela 1 apresenta os principais elementos da composição química do aço S235.

Tabela 1 - Composição química do aço S235

Elemento	Faixa típica (% em massa)
Carbono (C)	$\leq 0,22$
Manganês (Mn)	$\leq 1,60$
Fósforo (P)	$\leq 0,05$
Enxofre (S)	$\leq 0,05$

Fonte: Adaptado da norma EN 10025-2 (2019)

A estrutura foi desenvolvida com base nos conceitos de Resistência dos Materiais e nas normas técnicas vigentes, dentre as quais destacam-se:

- NBR 6120/2019 - Ações para o cálculo de estruturas;
- NBR 8800/2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios;
- NR 12/1978 - Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos;
- NBR 5410/2022 - Instalações elétricas de baixa tensão;
- NBR IEC 61010-1/2010 - Segurança de equipamentos de medição, controle e laboratório.

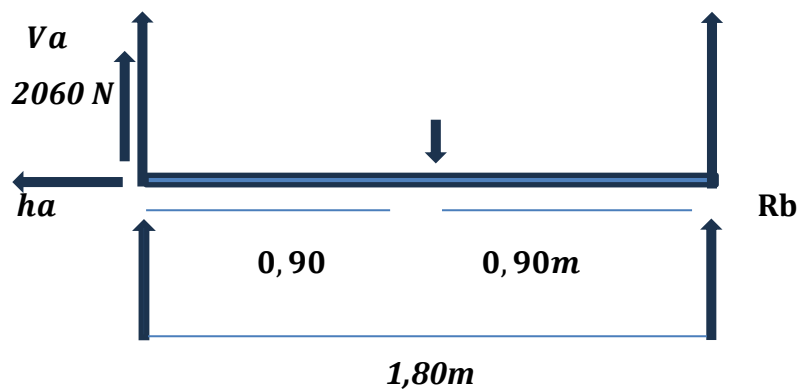
O dimensionamento estrutural foi realizado com base nas forças e momentos atuantes que permitiram prever o comportamento da estrutura e selecionar adequadamente os materiais e perfis empregados, conforme a Figura 12 em que representa o diagrama do corpo livre, bem como as equações 1, 2 e 3.

Na Equação 1 demonstra-se o cálculo do peso da bancada, ou seja, a força que a gravidade exerce sobre uma determinada massa, assim, obteve-se o valor aproximado.

(1)

$$p = m \cdot g = 210 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s} = 2.060,1\text{N}$$

Figura 12 – Representação do Diagrama do Corpo Livre



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Equação 3 demonstra-se os momentos atuantes que permitiram prever o comportamento da estrutura

(3)

$$M_{max} = \frac{2060\text{N} \cdot 1,80\text{m}}{4} = 927 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Conforme as etapas foram evoluindo, na Figura 13 apresenta-se uma montagem parcial da estrutura.

Figura 13 – Montagem parcial da estrutura.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

O acompanhamento da construção permitiu visualizar as verificações que asseguram a segurança estrutural, o desempenho funcional, a limitação de deformações excessivas e a otimização de materiais, tudo isso, influenciou diretamente no custo e na eficiência do projeto.

Entretanto, em razão do pequeno porte da bancada, das baixas cargas atuantes e das condições de operação previamente conhecidas, não houve necessidade de adotar o mesmo nível de rigor normativo exigido em projetos estruturais de maior complexidade.

Considerando as proporções da estrutura, observa-se que os materiais empregados apresentam boa procedência e propriedades mecânicas confiáveis. Além disso, a estrutura possui geometria simples, predominantemente retangular, com conexões simplificadas, tendo sido projetada para permanecer em ambiente plano e protegido das intempéries.

Com base nos elementos apresentados na Figura 14, foram adotadas estimativas para obtenção de valores aproximados. Na Tabela 2 demonstra-se a relação de elementos parciais da bancada.

Tabela 2 – Relação de elementos parciais da bancada

Materiais	Massa/velocidade/metro	Total
Reservatório	150 Kg	
Bombas	30 Kg	210 Kg
Diversos	30 Kg	
Força Gravitacional	9,81 m/s ² .	*
Estrutura vão longitudinal principal L	1,80m (viga apoiada com carga concentrada no centro)	*
Metalon retangular	50,0x30,0x2,0mm	*
Modulo de elasticidade	210GPa	*
Limite de escoamento	S235	*

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Após a conclusão da construção da bancada didática apresentada na Figura 14, foi desenvolvido um sistema de tubulação para água fria, conforme ilustrado no fluxograma da Figura B.2 no Apêndice B. O sistema é composto por instrumentos de medição de pressão e vazão, bem como bombas centrífugas que são responsáveis pelo processo de sucção e recalque do fluido.

Figura 14 – Bancada didática.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

No contexto citado, as bombas centrífugas desempenham um papel fundamental no sistema hidráulico destinado ao transporte de água, garantindo que o fluido alcance o ponto de destino com a vazão requerida, pressão adequada e perdas de carga dentro de limites aceitáveis, conforme discutido por (Macintyre, 1997).

O ponto de destino citado está relacionado no sistema com o circuito de alimentação e retorno de fluxo, o que permite a recirculação contínua da água durante os ensaios experimentais, conforme observado na Figura B.2 no Apêndice B.

No projeto, está sendo utilizada uma bomba centrífuga Schneider BC-98, fabricada pela Franklin Electric / Schneider, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Bomba Centrífuga Schneider/Franklin Electric modelo BC-98.



Fonte: Adaptado Manual Schneider (2026).

Conforme a Figura B.2 no Apêndice B que dispõe um fluxograma hidráulico, demonstra-se que a estrutura hidráulica da bancada é composta por duas bombas hidráulicas de 0,5 cv associadas em paralelo. Nessa configuração, ocorre aumento da vazão total do sistema, mantendo-se aproximadamente a mesma altura manométrica (Macintyre, 1997).

Dessa forma, realizou-se o dimensionamento adequado da tubulação de PVC com base na vazão máxima de 5,5 metros cúbicos por hora (m^3/h), conforme especificado no manual da bomba, bem como o comprimento total, velocidade e altura manométrica, visando determinar o diâmetro ótimo para diferentes condições de operação, considerando a variação da vazão e as perdas de carga associadas ao escoamento. O diâmetro da tubulação escolhido comportará a vazão máxima do sistema numa situação em que as duas bombas estiverem ligadas, sem que ultrapasse a velocidade máxima recomendada na sucção de 3,0 m/s conforme NBR 5626.

Em que pese a utilização da bancada durante as aulas não será frequente, pode-se concluir que a montagem do sistema com base na vazão variável irá atender pontualmente o desejável sem interferir na manipulação dos equipamentos e segurança.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados

Os resultados obtidos durante os ensaios experimentais da bancada hidráulica permitiram determinar a CCB por meio das medições de vazão realizadas em diferentes condições de operação no sistema.

Inicialmente, os testes foram executados com apenas uma bomba em funcionamento, possibilitando a obtenção dos parâmetros operacionais necessários para análise. Posteriormente, foram realizados ensaios com duas bombas operando paralelamente de forma simultânea, permitindo comparar os resultados experimentais e avaliar a influência da associação de bombas na variação da vazão do sistema.

Segundo Lopes (2007, p. 54):

“Respeitando os limites da bomba se o fluido encontra facilidade para passar por uma instalação (o caminho está “livre”), passa “muito” ($Q = <$ aumenta) e não é necessário muita “força de pressão” para empurrá-lo ($H_b = >$ diminui). No entanto, à medida que dificultamos o caminho do fluido, seja com o fechamento parcial de uma válvula, ou com uma tubulação muito longa, ou ainda com várias singularidades, a quantidade de fluido que consegue passar pela instalação diminui ($H_b = >$ diminui), sendo necessário uma maior “força de pressão” para empurrá-lo ($Q = <$ aumenta) a fim de vencer os obstáculos. Se dificultarmos aí máximo esse caminho fechando totalmente uma válvula, por exemplo, a pressão vai aumentar, a bomba fará o máximo esforço para empurrar o fluido e não conseguirá, atingindo então o ponto de pressão máxima, ou a carga máxima, que é o ponto shut-off e o fluido ficará recirculando dentro da bomba graças ao vazamento interno”.

No texto apresentado, demonstra-se a relação existente entre vazão e pressão em bombas centrífugas, desse modo, quando o fluido encontra menor resistência ao longo da tubulação, a vazão tende a aumentar, enquanto a pressão necessária para promover o escoamento diminui.

Por outro lado, ao dificultar a passagem do fluido por meio de válvulas parcialmente fechadas, tubulações longas ou singularidades, ocorre redução da vazão e aumento da pressão desenvolvida pela bomba.

Em situações extremas, como no fechamento total da válvula, a bomba atinge a condição de *shut-off*, na qual ocorre pressão máxima e vazão nula, podendo causar recirculação interna e esforços excessivos no equipamento.

Esse fenômeno vai ao encontro do tema proposto à CCB, pois evidencia-se que o ponto de operação depende das condições hidráulicas do sistema.

No primeiro experimento, foi adotada como condição inicial a vazão nula ($Q = 0$) e a carga manométrica máxima da bomba. Considerando que o

rotâmetro utilizado possui faixa de medição de 0 a 12 m^3/h , com resolução de 1 m^3/h , foram realizadas leituras em incrementos de 0,5 m^3/h , permitindo uma maior quantidade de pontos experimentais e melhor definição da curva de desempenho.

As medições foram efetuadas em diferentes condições operacionais do sistema, possibilitando a obtenção dos valores de vazão e carga manométrica correspondentes. A partir dos dados coletados, observou-se a redução da carga manométrica à medida que a vazão aumentava.

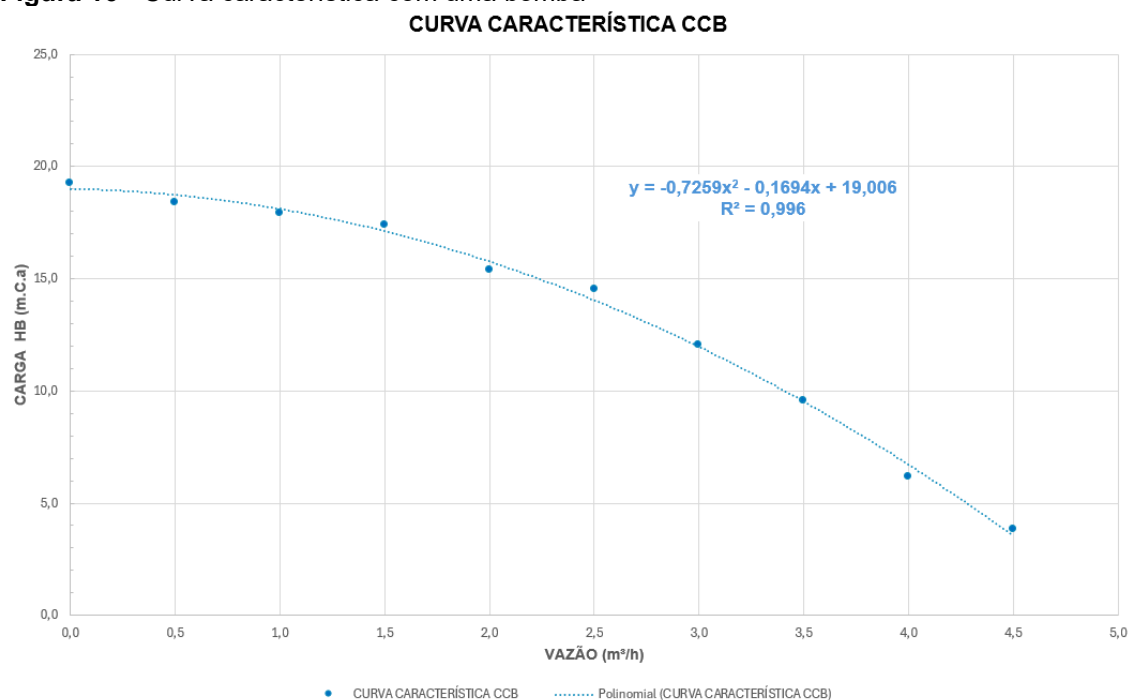
Desse modo, os resultados obtidos permitiram analisar o comportamento hidráulico da bomba e fornecer os pontos necessários para a construção de sua curva característica. Os dados experimentais de vazão e carga manométrica para a condição de operação com uma bomba em funcionamento são apresentados na Tabela 3 que contém dados de vazão e carga manométrica obtidos com uma bomba ligada.

Tabela 3 - Dados de vazão e carga manométrica obtidos com uma bomba ligada

Dados de carga obtidos com uma bomba ligada				
Vazão (m^3/h)	Pressão sucção ($mmHg$)	Pressão sucção ($m. c. a$)	Pressão recalque ($m. c. a$)	ΔP ($m. c. a$)
0	-20	-0,27	19	19,27
0,5	-30	-0,41	18	18,41
1	-30	-0,41	17,5	17,91
1,5	-30	-0,41	17	17,41
2	-30	-0,41	15	15,41
2,5	-40	-0,54	14	14,54
3	-40	-0,54	11,5	12,04
3,5	-40	-0,54	9	9,54
4	-50	-0,68	5,5	6,18
4,5	-60	-0,82	3	3,82

Fonte: Elaborada pelos alunos (2026)

Com os dados obtidos de cargas manométrica e vazões medidas com o auxílio de instrumentos instalados na rede, foi gerada a curva característica com uma bomba ligada. Na Figura 16 demonstra-se a Curva característica com uma bomba.

Figura 16 - Curva característica com uma bomba

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

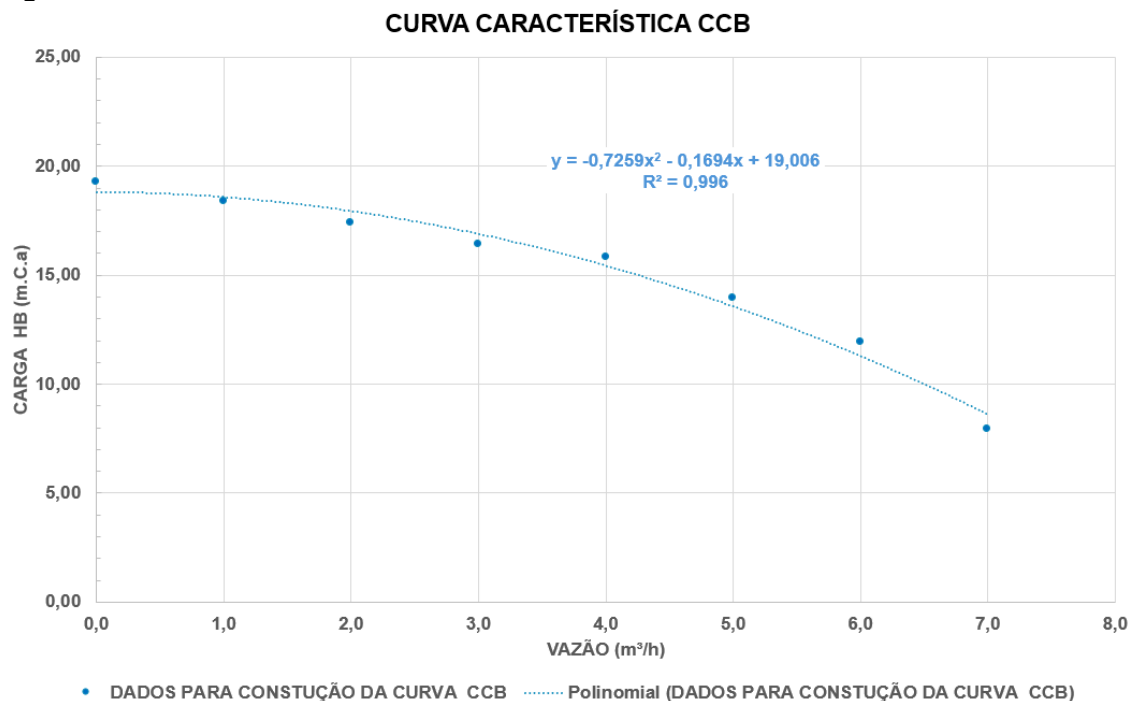
Demonstra-se no segundo ensaio, o qual foi ligado a segunda bomba que foram adotadas como condição inicial a vazão nula e a pressão máxima do sistema. A partir dessas condições, foram aplicados incrementos graduais de 0,1 m^3/h no medidor de vazão, possibilitando a realização das medições em diferentes condições operacionais da bancada hidráulica. Na Tabela 4 demonstra-se dados de vazão e carga manométrica obtidos com duas bombas ligadas.

Tabela 4 - Dados de vazão e carga manométrica obtidos com duas bombas ligadas

Dados de carga obtidos com duas bombas ligadas				
Vazão (m^3/h)	Pressão Sucção ($mmHg$)	Pressão Sucção ($m. c. a$)	Pressão recalque ($m. c. a$)	ΔP ($m. c. a$)
0	-20	-0,27	19,0	19,27
1	-30	-0,41	18,0	18,41
2	-30	-0,41	17,0	17,41
3	-30	-0,41	16,0	16,41
4	-60	-0,82	15,0	15,82
5	-70	-0,95	13,0	13,95
6	-70	-0,95	11,0	11,95
7	-70	-0,95	7,0	7,95

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

Com os dados obtidos de cargas manométrica e vazões medidas com o auxílio de instrumentos instalados na rede, foi gerada a curva característica com duas bombas ligadas. Na Figura 17 apresenta-se a curva característica com duas bombas.

Figura 17 - Curva característica com duas bombas

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

A partir dos dados coletados, foi possível analisar o desempenho operacional da bancada e representar graficamente o comportamento das bombas centrífugas em função das condições de escoamento.

5.2 Discussões

5.2.1 Projeto de construção da bancada

A construção da bancada didática permitiu integrar conceitos teóricos e práticos relacionados à Mecânica dos Fluidos, resistência dos materiais e sistemas hidráulicos, proporcionando uma abordagem aplicada ao estudo da curva característica de bombas centrífugas. Conforme a Figura C.1 no Apêndice C, a utilização de uma estrutura experimental voltada ao ambiente acadêmico favorece o desenvolvimento da aprendizagem prática, uma vez que possibilita a observação direta dos fenômenos hidráulicos, das variáveis operacionais e da influência dos componentes do sistema sobre o comportamento do escoamento.

Do ponto de vista estrutural, a escolha do perfil metálico para composição da bancada mostrou-se adequada em razão da necessidade de resistência mecânica, estabilidade e segurança durante os ensaios experimentais. A utilização do aço carbono *S235*, conforme especificado pela norma *EN 10025 – 2*, apresenta propriedades compatíveis com aplicações estruturais de pequeno porte, especialmente pela sua boa soldabilidade e resistência mecânica satisfatória para suportar os esforços atuantes no sistema. Além disso, a adoção da solda *MGM 13* mostrou compatibilidade com o material empregado, contribuindo para a integridade estrutural do conjunto.

Embora o projeto tenha considerado referências normativas relacionadas ao dimensionamento estrutural e segurança em equipamentos laboratoriais, verificou-se que as condições operacionais da bancada apresentam baixo nível de complexidade quando comparadas a estruturas de grande porte. Dessa forma, as análises realizadas tiveram caráter simplificado, porém suficientes para assegurar condições adequadas de funcionamento, segurança e confiabilidade durante a operação. A geometria simples da estrutura, associada às baixas cargas aplicadas e ao ambiente protegido de instalação, irá contribuir para reduzir a ocorrência de esforços excessivos e deformações significativas.

A estimativa das cargas atuantes demonstrou que a maior parcela do carregamento está associada ao reservatório preenchido com água, o que

evidencia a importância da correta distribuição de esforços ao longo da estrutura principal. Diante disso, a consideração das forças gravitacionais da estrutura e das propriedades mecânicas dos materiais permitiu uma análise coerente das condições de resistência e estabilidade da bancada.

5.2.2 Considerações sobre o sistema hidráulico da bancada didática

A análise do sistema hidráulico aberto e fechado demonstra que ambos possuem características fundamentais para o estudo experimental da Mecânica dos Fluidos, embora apresentem diferentes condições de contorno relacionadas à pressão e à interação com o ambiente externo.

No circuito hidráulico fechado, conforme descrito por Lopes (2007), o fluido circula continuamente por uma tubulação que retorna à própria sucção da bomba, caracterizando um sistema de recirculação. Nessa configuração, a altura estática é considerada nula, uma vez que não há diferença permanente de nível entre os pontos de sucção e recalque. Assim, a energia fornecida pela bomba é destinada principalmente ao vencimento das perdas de carga distribuídas e localizadas existentes ao longo do circuito.

Por outro lado, o sistema hidráulico aberto caracteriza-se pela presença de uma superfície livre em contato com a atmosfera.

Brunetti (2008) destaca que em reservatórios abertos, as pressões manométricas na superfície livre são nulas e as velocidades podem ser consideradas desprezíveis.

De forma agregada, White (2011) afirma que a superfície livre submetida à pressão atmosférica constitui a principal característica dos escoamentos abertos, permitindo considerar a pressão constante ao longo dessa interface.

Aplicados a uma bancada didática de Mecânica dos Fluidos, esses conceitos permitem compreender que o reservatório aberto atua como uma condição de referência para a análise hidráulica do sistema. Dessa forma, a aplicação das equações da continuidade, de Bernoulli e da conservação de energia torna-se mais simples e objetiva, possibilitando a observação prática de fenômenos como perdas de carga, medição de vazão e influência do atrito no escoamento.

Embora a bancada didática utilize um reservatório aberto à atmosfera, sua operação ocorre frequentemente em regime de recirculação, fazendo com que

apresente simultaneamente características de sistemas abertos e fechados. Do ponto de vista hidráulico, a superfície livre estabelece a condição atmosférica de referência, enquanto a recirculação contínua do fluido promove um comportamento semelhante ao de um circuito fechado.

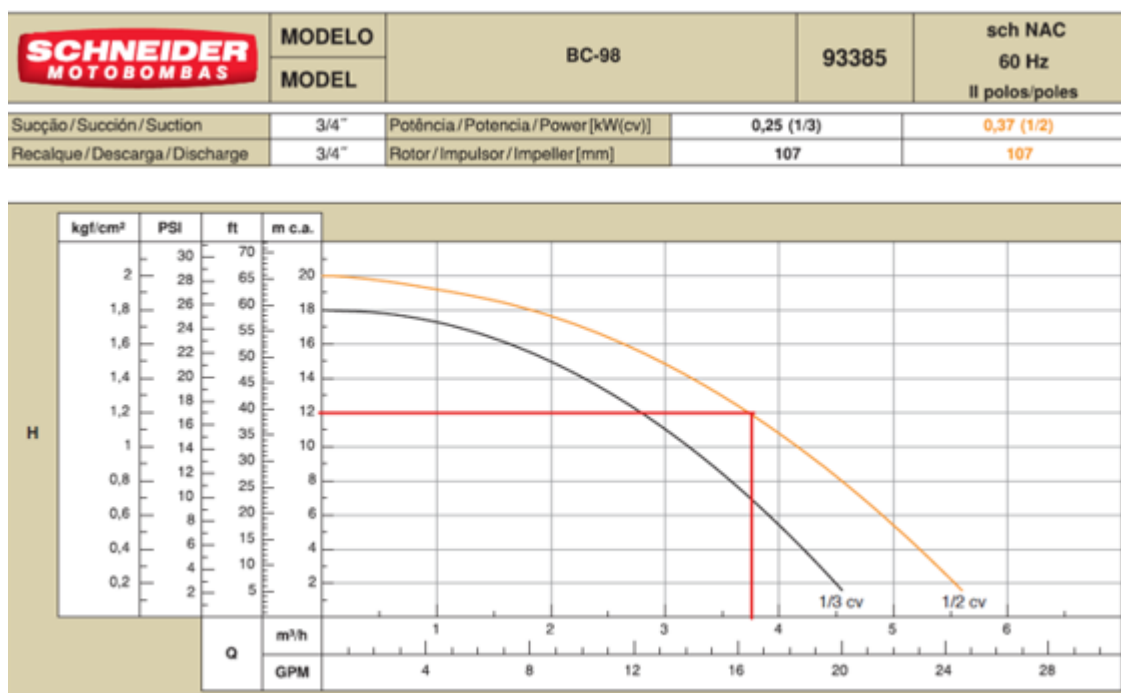
Essa combinação torna a bancada uma ferramenta adequada para a validação experimental dos princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos, proporcionando a correlação entre os modelos teóricos e o comportamento real dos sistemas hidráulicos.

5.2.3 Escolha do diâmetro de projeto

Durante o projeto de seleção das tubulações houve uma análise preliminar que indicou uma tubulação com diâmetro nominal de 1 polegada (1"), essa apresentava capacidade teórica para atender à vazão requerida, considerando condições ideais de escoamento e desconsiderando os efeitos das perdas de carga distribuídas e localizadas. Entretanto, ao incorporar as condições reais de operação do sistema hidráulico, observou-se a necessidade de uma avaliação mais criteriosa da relação entre vazão, velocidade do fluido e perdas de carga, visando garantir maior eficiência operacional e estabilidade hidráulica do conjunto.

Considera-se a operação de duas bombas associadas em paralelo, a vazão total de projeto de $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ é dividida igualmente entre os equipamentos, correspondendo a aproximadamente $3,75 \text{ m}^3/\text{h}$ por bomba. Verifica-se na CCB fabricante que, para essa vazão, a bomba fornece uma altura manométrica próxima de 12 m.c.a. , valor compatível com a carga hidráulica requerida pelo sistema. Na Figura 18 apresenta-se a CCB do fabricante com duas bombas ligadas.

Figura 18 – CCB fabricante com duas bombas ligadas



Fonte: Adaptado MANUAL TÉCNICO SCHNEIDER (2026)

Considerando esse aspecto, definiu-se como diâmetro mais adequado a tubulação de 1 ¼" a qual possibilitou o atendimento da operação simultânea das duas bombas ligadas associadas em paralelo, mantendo a velocidade máxima de escoamento em aproximadamente 2,14 m/s para uma vazão total de 7,5 m^3/h , conforme Tabela D.1 no Apêndice D e Tabela 4.

Esse resultado demonstra que o aumento do diâmetro contribuiu para a redução das perdas de carga e para condições mais favoráveis de funcionamento do sistema, evitando velocidades excessivas no interior da tubulação e correr o risco de trabalhar numa condição fora da curva característica do fabricante.

Além disso, o valor obtido encontra-se em conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da ABNT NBR 5626/2020, que recomenda velocidades máximas de escoamento de até 3,0 m/s em tubulações hidráulicas. Dessa forma, os resultados obtidos validam o dimensionamento adotado e demonstram adequação técnica às recomendações normativas, conforme apresentado na Equação 4, utilizada para o cálculo da velocidade do escoamento.

5.2.4 Aquisição dos materiais e equipamentos

Os materiais e equipamentos utilizados na construção da bancada didática foram selecionados com base em critérios técnicos, operacionais e financeiros, buscando garantir viabilidade econômica e desempenho adequado do sistema experimental.

Os custos relacionados à estrutura da bancada e aos materiais hidráulicos foram integralmente financiados pelos próprios alunos envolvidos no Trabalho de Conclusão de Curso. Por sua vez, as bombas hidráulicas utilizadas no projeto foram doadas pela Franklin Electric/Schneider Motobombas, enquanto os manômetros e vacuômetros foram cedidos pela Fatec Itaquera, contribuindo significativamente para a viabilização da bancada experimental.

5.2.5 Procedimento de startup do experimento

Antes do início dos ensaios experimentais, realizou-se uma avaliação de todo o sistema da bancada didática, com o objetivo de verificar as condições operacionais e assegurar a segurança durante a energização das bombas hidráulicas. Nessa etapa, foram analisados os componentes considerados sensíveis ao funcionamento do sistema, buscando minimizar riscos operacionais, vazamentos e possíveis falhas durante os testes.

O reservatório foi preenchido com aproximadamente 70% de sua capacidade total de água, condição adotada para garantir estabilidade operacional e adequada recirculação do fluido no circuito hidráulico fechado. Além disso, todos os componentes da instalação, incluindo tubulações de PVC, curvas, conexões tipo Têe, válvulas, medidor de vazão, manômetros e vacuômetros, passaram por inspeção prévia de montagem e vedação, sendo considerados aptos para operação.

Antes da partida das bombas centrífugas, realizou-se o procedimento de escorva do sistema hidráulico, pois com a posição da disposição gravitacional do reservatório houve a garantia do preenchimento da tubulação de sucção e do corpo das bombas com água, condição necessária para evitar funcionamento a seco e assegurar o correto desempenho operacional do conjunto hidráulico.

5.2.5.1 Ligação da primeira bomba

Durante a operação inicial da primeira bomba hidráulica, foram verificadas as condições de estanqueidade das linhas do sistema, bem como o

comportamento da sucção e do recalque do fluido. Além disso, avaliou-se a estabilidade operacional da bancada e o funcionamento adequado dos instrumentos de medição instalados no circuito hidráulico.

Observou-se que, mesmo sob determinadas condições de vazão e pressão, o sistema apresentou funcionamento estável, sem oscilações significativas ou alterações que comprometessem a operação da bancada experimental.

5.2.5.2 Ligação da segunda bomba

No segundo momento, após a energização da segunda bomba hidráulica, verificou-se aumento parcial da vazão do sistema, acompanhado pela elevação da pressão na tubulação, condição esperada em associações de bombas centrífugas em paralelo.

Em decorrência desse novo regime operacional, foi identificado um pequeno gotejamento em uma das linhas secundárias do circuito hidráulico. Contudo, a ocorrência não provocou interferências relevantes no desempenho do sistema, e nem comprometeu a continuidade dos ensaios experimentais. Posteriormente, realizou-se a correção da vedação no ponto identificado, restabelecendo integralmente a estanqueidade da instalação hidráulica.

Posteriormente, durante a operação simultânea das bombas hidráulicas, observou-se dificuldade no processo de sucção do fluido, uma vez que o sistema não conseguia manter o escoamento adequado da água. Diante dessa condição, realizou-se o desligamento imediato das bombas para análise das possíveis causas relacionadas ao comportamento hidráulico do sistema.

Após a verificação operacional, constatou-se que o reservatório estava tampado, ou seja, parcialmente vedado durante o funcionamento das bombas. Nessa condição, observou-se que o nível de água no interior da caixa sofria variações em função da sucção e do retorno do fluido no circuito, reduzindo momentaneamente seu volume durante a demanda hidráulica imposta pelas bombas e elevando-se novamente com o retorno da água ao reservatório.

Esse comportamento favoreceu a formação de um vácuo parcial negativo no interior do reservatório, devido à ausência de adequada equalização com a pressão atmosférica. Como consequência, ocorreu aumento da resistência à

sucção na linha de entrada das bombas, dificultando o deslocamento do fluido e comprometendo temporariamente a eficiência operacional do sistema hidráulico.

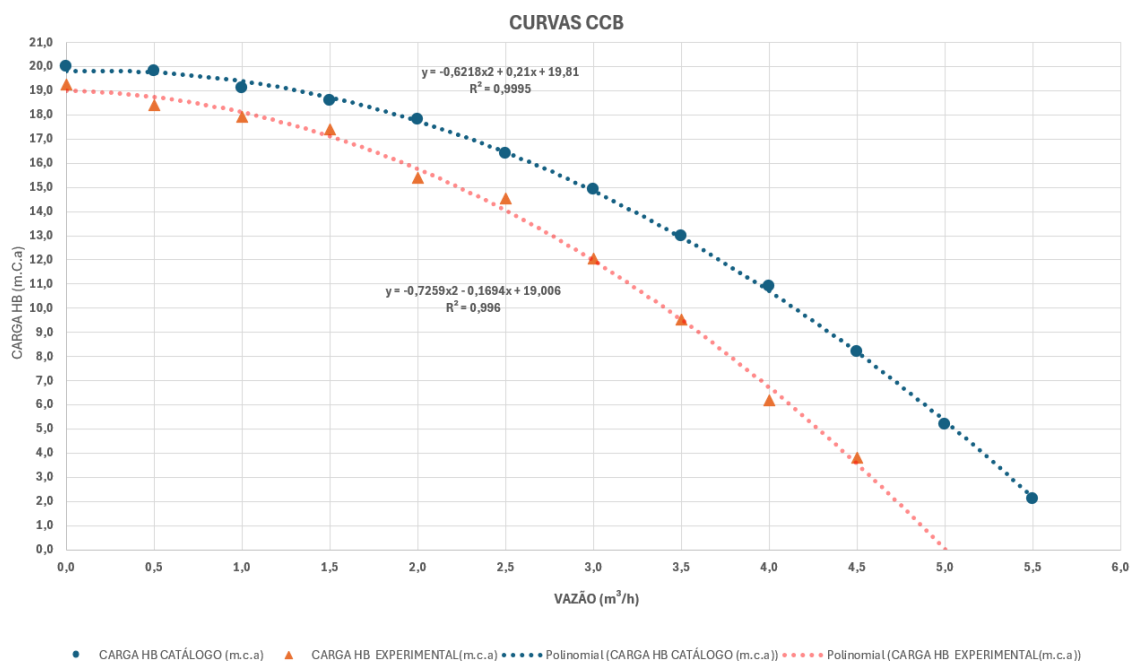
Do ponto de vista da Mecânica dos Fluidos, essa condição está associada à redução da pressão disponível na sucção da bomba, situação que pode favorecer fenômenos indesejáveis, como instabilidade no escoamento, perda de capacidade de bombeamento e tendência à cavitação. Após a identificação do problema, foram adotadas medidas corretivas para permitir a ventilação do reservatório, restabelecendo a estabilidade operacional da bancada didática.

5.2.6 Determinação experimental da Curva Característica da Bomba

Na Figura 19 demonstra-se a curva experimental que está representada pela linha laranja, enquanto a curva de catálogo do fabricante é representada pela linha azul.

Os pontos utilizados para a construção das curvas correspondem aos valores obtidos experimentalmente e aos dados fornecidos pelo fabricante, respectivamente. Já as linhas de tendência polinomiais foram empregadas para representar o comportamento hidráulico da bomba ao longo da faixa de operação analisada.

Observa-se que ambas as curvas apresentam comportamento semelhante, evidenciando a redução da carga manométrica com o aumento da vazão. A proximidade entre a curva experimental (laranja) e a curva de catálogo (azul) demonstra que os resultados obtidos na bancada didática reproduziram satisfatoriamente o desempenho hidráulico previsto pelo fabricante para a bomba analisada.

Figura 19 - Curva característica comparativa

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

A análise das equações de ajuste polinomial demonstrou elevado coeficiente de determinação, com valores de R^2 iguais a 0,9995 para a curva de catálogo e 0,996 para a curva experimental, indicando excelente correlação entre os dados medidos e o modelo matemático adotado. O resultado evidencia a confiabilidade dos procedimentos experimentais realizados na bancada didática.

Observou-se ainda que a curva experimental apresentou valores de carga ligeiramente inferiores aos valores de catálogo ao longo da faixa de operação. Essa diferença pode ser atribuída a fatores inerentes ao sistema real, tais como temperatura, atritos, perdas de carga nas tubulações e conexões, pequenas imprecisões dos instrumentos de medição e condições operacionais distintas daquelas utilizadas pelo fabricante durante os ensaios de certificação realizados em laboratório.

Apesar dessas diferenças, os resultados obtidos demonstram que a bancada didática reproduziu adequadamente o comportamento hidráulico da bomba estudada, validando sua utilização como ferramenta de ensino e experimentação.

O experimento possibilitou a aplicação prática dos conceitos de vazão, carga manométrica, perdas de carga, curvas características e análise de

desempenho de bombas hidráulicas, promovendo a integração entre os conhecimentos teóricos e a observação experimental.

5.2.7 Análise das condições de sucção e verificação de possibilidade de cavitação

Durante os ensaios foram realizadas medições das pressões na linha de sucção por meio de vacuômetros instalados na entrada. Conforme Tabela 4, os menores valores registrados ocorreram na condição de maior vazão do sistema, atingindo aproximadamente - 0,95 *m. c. a.*

Considerando a pressão atmosférica de 93 *kPa* da cidade de São Paulo, foi obtido uma pressão equivalente a aproximadamente 9,48 *m. c. a.*, conforme Equação 13.

Pode-se afirmar que a pressão absoluta na sucção pode ser estimada pela diferença entre a pressão atmosférica e pressão indicada pelo vacuômetro que resultou em 8,53 *m. c. a.*

Para temperatura a 25°C a pressão de vapor de água corresponde a cerca de 3,17 *kPa* que equivale a 0,32 *m. c. a.* Assim, verifica-se que a pressão absoluta medida na sucção permaneceu superior à pressão de vapor do fluido, apresentando uma margem aproximada de 8,21 *m. c. a.*

Diante desse contexto, a análise dos resultados experimentais demonstrou que a pressão disponível na sucção permaneceu acima da pressão de vapor de água durante toda a faixa de operação.

Dessa forma, conclui-se que não houve evidências da ocorrência de cavitação ao longo do ensaio realizado, corroborando o comportamento esperado para um sistema operando com sucção afogada e condições adequadas de NPSH disponível.

6 CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo desenvolver uma bancada didática para estudos experimentais em Mecânica dos Fluidos, destinada ao levantamento da curva característica de uma bomba centrífuga. Os resultados obtidos demonstraram que o objetivo geral foi plenamente alcançado, uma vez que foi possível projetar, construir e colocar em operação uma bancada experimental capaz de reproduzir, de forma prática, os principais fenômenos hidráulicos abordados ao longo do curso de Refrigeração, Ventilação e Ar Condicionado.

Os ensaios realizados permitiram a obtenção de dados de vazão, pressão de sucção e pressão de recalque em diferentes condições operacionais, possibilitando a construção das curvas características da bomba centrífuga BC-98. Os resultados experimentais apresentaram comportamento coerente com os fundamentos teóricos da Mecânica dos Fluidos, evidenciando a redução da altura manométrica com o aumento da vazão e validando os princípios estudados no referencial teórico.

Além da determinação da curva característica, o projeto possibilitou a aplicação prática de conceitos relacionados às perdas de carga, equação da continuidade, equação da energia, número de Reynolds, dimensionamento hidráulico e análise das condições de sucção da bomba. Dessa forma, a bancada mostrou-se adequada para a integração entre teoria e prática, contribuindo para o processo de ensino-aprendizagem e para a formação técnica dos estudantes.

Embora algumas limitações tenham sido observadas, principalmente relacionadas à instrumentação disponível e à ausência de sistemas automatizados de aquisição de dados, tais fatores não comprometeram os objetivos propostos. Pelo contrário, evidenciaram oportunidades para futuras melhorias e ampliação das funcionalidades da bancada.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de melhorias estruturais e operacionais na bancada hidráulica utilizada nos ensaios de Mecânica dos Fluidos, visando ampliar a confiabilidade, segurança e eficiência do sistema. Entre as principais sugestões, destaca-se a elaboração de um quadro elétrico adequado para o acionamento e proteção dos equipamentos, o que proporcionará uma maior organização e segurança operacional durante os experimentos.

Recomenda-se também o desenvolvimento de um manual padronizado de manejo e operação da bancada, com o objetivo de orientar corretamente os procedimentos experimentais, reduzir erros operacionais e garantir maior repetibilidade dos ensaios realizados em laboratório.

Outra proposta relevante consiste na implementação de sistemas de automação e monitoramento, permitindo maior controle das variáveis hidráulicas e operacionais do sistema. Além disso, sugere-se a inserção de equipamentos de medição, como sensores de pressão, temperatura, vazão e nível, inversores, bem como, manômetros distribuídos na entrada e saída de cada linha contribuindo para maior precisão na coleta de dados experimentais e análises técnicas.

No aspecto da segurança, recomenda-se a instalação de equipamentos de proteção e sinalização, incluindo placas de advertência, identificação de componentes e direcionamento operacional, visando atender às boas práticas laboratoriais e proporcionar maior segurança aos usuários durante a utilização da bancada hidráulica.

Como medida preventiva, recomenda-se que, durante os períodos de recesso ou inatividade do sistema, a água seja totalmente drenada da bancada. Essa prática evita a ocorrência de processos de oxidação na carcaça, no rotor e nas pás da bomba, reduzindo a formação de incrustações e depósitos que podem comprometer o desempenho dos componentes e ocasionar danos ao sistema hidráulico.

Pode-se concluir que a bancada didática desenvolvida constitui uma ferramenta eficiente para o estudo experimental da Mecânica dos Fluidos, permitindo a validação de conceitos teóricos por meio de experimentação prática. Adicionalmente, o projeto apresenta potencial para futuras expansões, incluindo novos instrumentos de medição, sistemas digitais de monitoramento, estudos de cavitação, determinação de rendimento hidráulico e análise de diferentes configurações de bombas e sistemas de tubulação, ampliando ainda mais sua aplicação acadêmica e tecnológica.

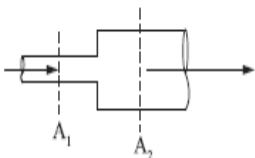
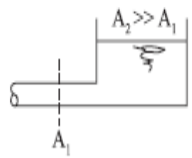
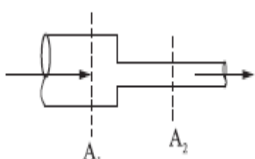
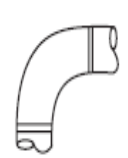
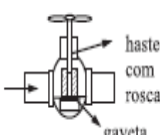
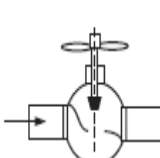
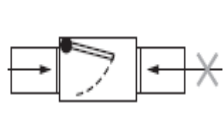
7 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626: sistemas prediais de água fria e água quente: projeto, execução, operação e manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60439: conjuntos de manobra e controle de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 61010-1: requisitos de segurança para equipamentos elétricos de medição, controle e uso em laboratório: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 10: segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília: MTE, 1978.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 12: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Brasília: MTE, 1978.
- BARROS, Marta Silene Ferreira et al. A relação teoria e prática na formação docente: condição essencial para o trabalho pedagógico. Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação, Araraquara, v. 15, n. 1, p. 305-318, jan./mar.2020.
- BRUNETTI, Franco. Mecânica dos fluidos. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2008.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. Porto Alegre: AMGH, 2007.
- COELHO, João Carlos Martins. Energia e fluidos: Mecânica dos fluidos. São Paulo:Blucher,2016.
- COSTA, Teixeira da; SANTOS, Davide; LANÇA, Rui. TURBO MÁQUINAS HIDRÁULICAS: Bombas. Faro: UNIVERSIDADE DO ALGARVE, 2001.
- GÜLICH, Johann Friedrich. Centrifugal pumps. 2. ed. Berlin; Heidelberg: Springer,2010.

- HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- IZOLA, Dawson Tadeu. *Práticas de laboratório: mecânica dos fluidos*. 1. ed. Araras, SP: Fundação Hermínio Ometto – FHO/CEMAD, 2020. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 14 jun. 2026.
- LOPES, Santos Sérgio dos. Bombas e instalações hidráulicas. São Paulo: LTC, 2007.
- MASSOUD, Mahmoud. Engineering thermofluids: thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- MACINTYRE, Archibald Joseph. Bombas e instalações de bombeamento. 2ª. ed. rev. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A, 1997.
- MELCONIAN, Sarkis. Mecânica técnica e resistência dos materiais. São Paulo: Érica, 2012.
- MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. São Paulo: Blucher, 2004.
- PAIVA, Maria Rita Pereira de; FAGUNDES, Gabriella Fernandes; CAVALLARO, Reginaldo José. Projeto de bancada didática para determinar perda de carga em tubulação e conexões. Research, Society and Development, v. 9, n. 10, e8289109127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9127>.
- POTTER, Merle C.; WIGGERT, David C. Mecânica dos fluidos. 3. ed. São Paulo: Thomson, 2004.
- STEPANOFF, Alexey J. Centrifugal and axial flow pumps: theory, design, and application. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1957.
- SCHNEIDER, Manual Técnico. BC-98: centrífugas monoestágio. Disponível em: Schneider Motobombas – BC-98. Acesso em: 7 maio 2026.
- WHITE, Frank M. Mecânica dos fluidos. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

8 ANEXO A – Referencial Teórico

Tabela A.1 - Coeficientes de forma.

Singularidade	Esquema	k_s
Alargamento		$(1 - A_1/A_2)$ (no caso, $v = v_1$)
Caso limite		1
Estreitamento		$\phi (A_1/A_2)$
Caso limite		0,5
Cotovelo a 90°		0,9
Válvula de gaveta		Totalmente aberta 0,2
Válvula tipo globo		Totalmente aberta 10
Válvula de retenção		0,5

Fonte: Brunetti, (2008, 2. ed.).

Tabela A.2 - Comprimentos equivalentes em metros de acessórios.



MANUAL TÉCNICO

TABELA 7 - PERDA DE CARGA EM ACESSÓRIOS										
Tabela de perdas de cargas localizadas em conexões, considerando-se os comprimentos equivalentes em metros de canalização										
CONEXÃO		Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização								
		MATERIAL	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	5"
Curva 90°		PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,9
		Metal	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	2,1
Curva 45°		PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		Metal	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9
Joelho 90°		PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,9
		Metal	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	4,2
Joelho 45°		PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	2,5
		Metal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,9
Tê de passagem direta		PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	3,3
		Metal	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,7
Tê de saída lateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	10,0
		Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	8,4
Tê de saída bilateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	10,0
		Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	8,4
União		PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,25
		Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04
Saída de canalização		PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	4,9
		Metal	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	4,0
Luva de redução (")		PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	1,2
		Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	1,07
Registro de gaveta ou esfera aberto		PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1
		Metal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,9
Registro de globo aberto		Metal	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	43,0
Registro de ângulo aberto		Metal	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	21,0
Válvula de pé com crivo		PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	37,4
		Metal	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	30,0
Válvula de Retenção	Horizontal	Metal	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	10,4
	Vertical	Metal	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	16,1

Fonte: Adaptado do MANUAL TÉCNICO SCHNEIDER, (2026)

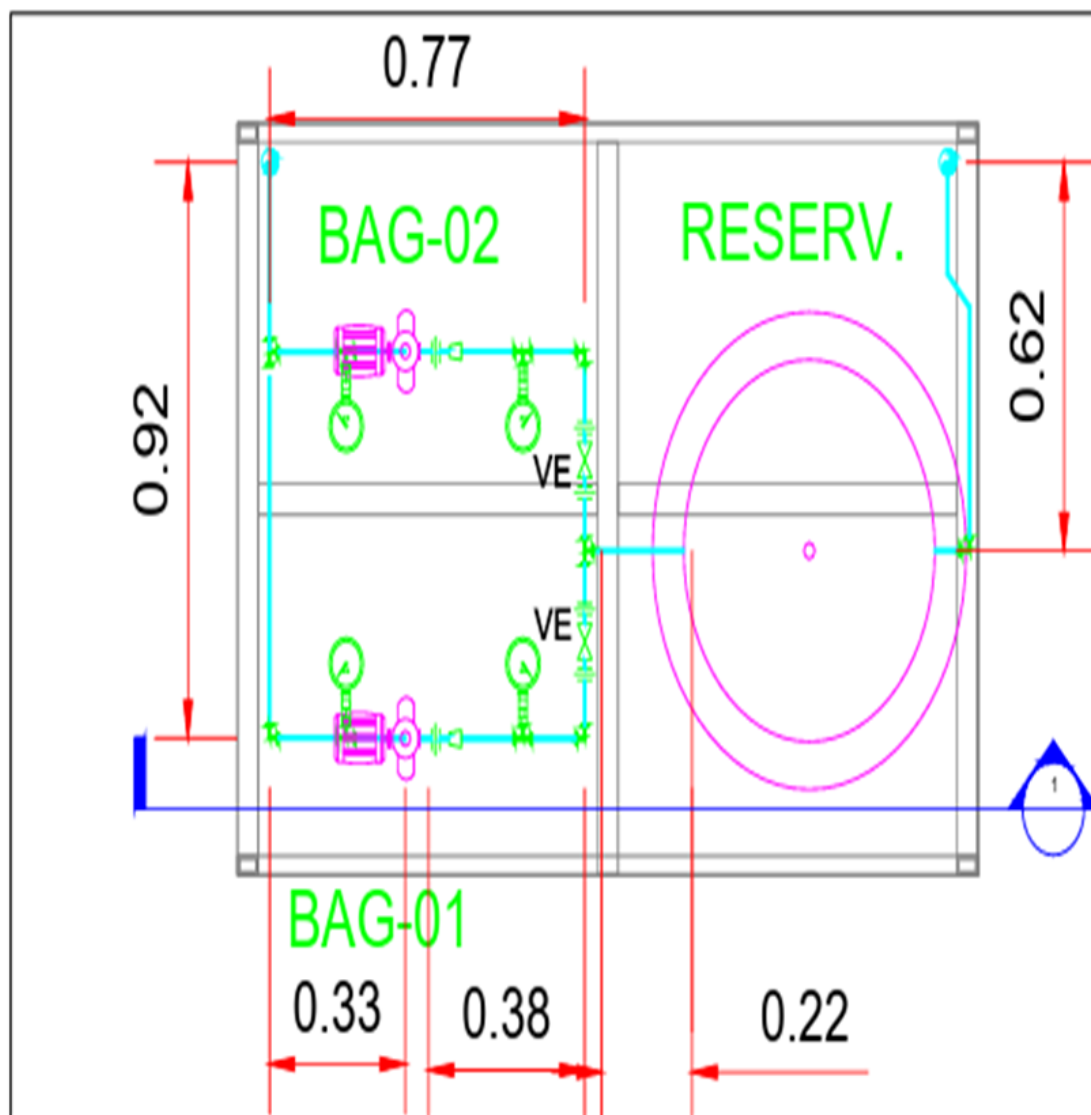
Tabela A.3 - Valores da rugosidade equivalente absoluta de alguns materiais.

MATERIAL	ϵ (mm) Rugosidade Absoluta Equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: Universidade de São Paulo (USP, 2014).

9 APÊNDICE B - Referencial Teórico

Figura B.1 - Vista superior da bancada didática em autocad

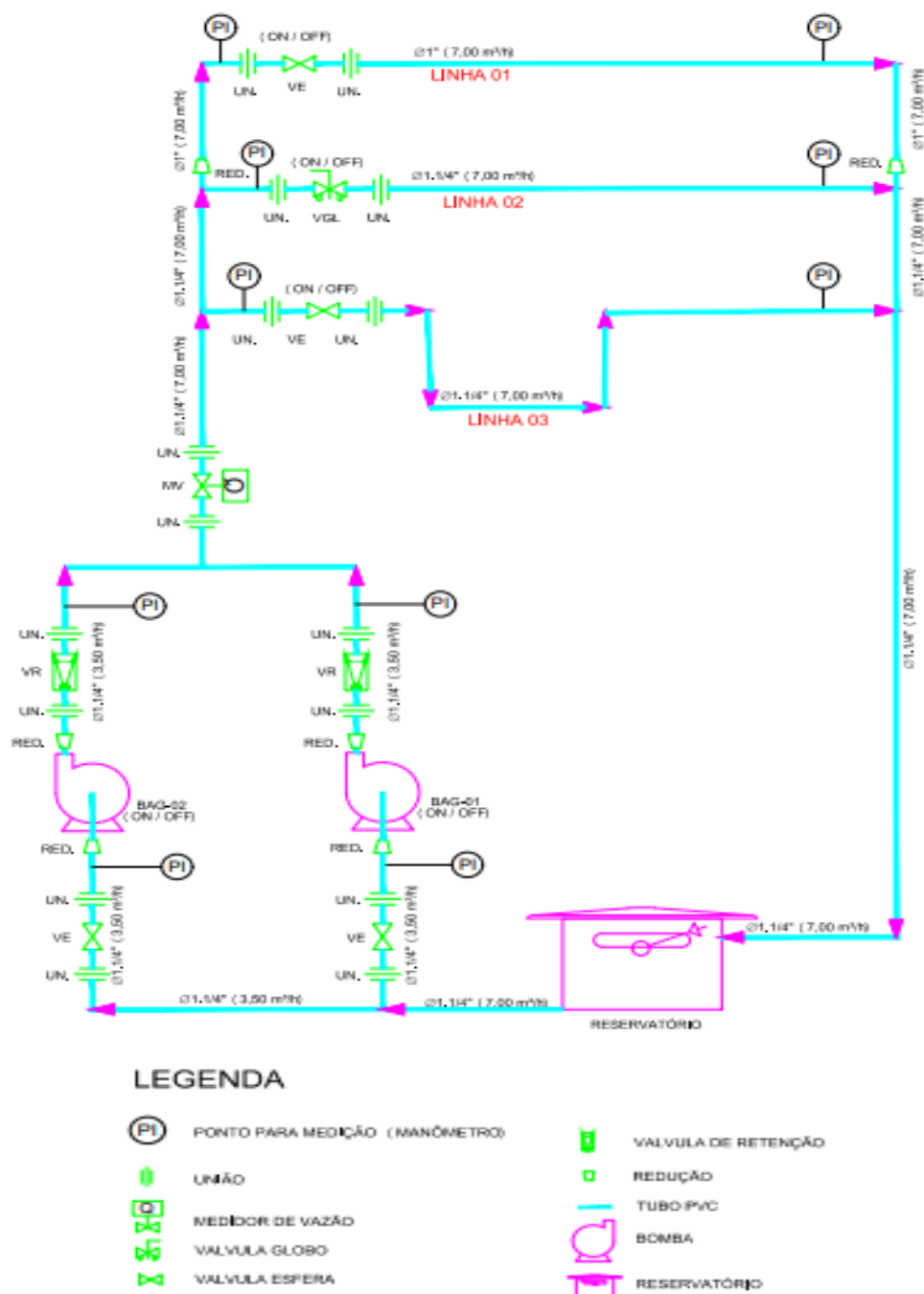


PLANTA DA REDE HIDRAULICA

S/ ESC.:

NUMERO DO DESENHO:	REVISÃO:	GRUPO TCC:
A4-TCC-MH-001-R03	R03	
ASSUNTO:	ESC.:	
PLANTA DA REDE DE HIDRAULICA E CORTE 01	S/ ESC.:	
PROJETISTA:	ORIENTADOR:	
GRUPO TCC	TELMA N.	

Figura B.2 - Fluxograma hidráulico da bancada



FLUXOGRAMA DE HIDRAULICA

S/ ESC.:

NUMERO DO DESENHO:

A4-TCC-FH-001-R3

ASSUNTO:

FLUXOGRAMA DA REDE DE HIDRAULICA

PROJETISTA:

GRUPO TCC

REVISÃO:

03

ESC.:

S/ ESC.:

ORIENTADOR:

TELMA N.

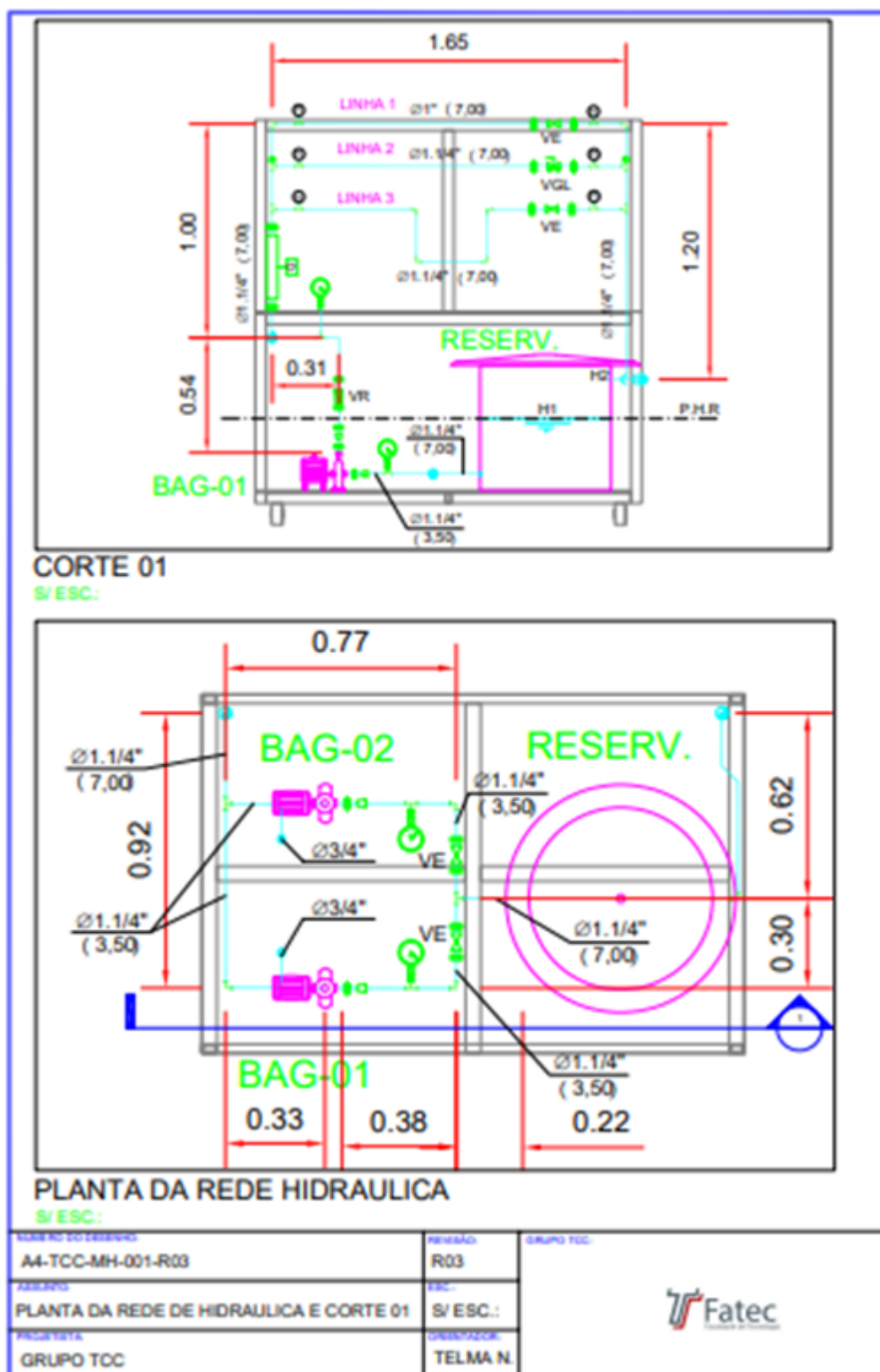
GRUPO TCC:

Fatec
Faculdade de Tecnologia

Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

10 APÊNDICE C - DISCUSSÕES

Figura C.1 - Corte 01 da bancada hidráulica



Fonte: Elaborada pelos autores (2026)

