

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI - UFSJ
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALICE HELENA RIBEIRO GONÇALVES
LEONARDO DA SILVA VARGAS DE FARIA
MATHEUS EXPEDITO DA SILVA
SARAH EULÁLIA BATISTA

ADAPTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ROTEIROS
DIDÁTICOS PARA AS AULAS PRÁTICAS DA DISCIPLINA MECÂNICA DOS
FLUIDOS DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DO CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

Ouro Branco, Minas Gerais

2016

Alice Helena Ribeiro Gonçalves
Leonardo Da Silva Vargas De Faria
Matheus Expedito Da Silva
Sarah Eulália Batista

**ADAPTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ROTEIROS
DIDÁTICOS PARA AS AULAS PRÁTICAS DA DISCIPLINA MECÂNICA DOS
FLUIDOS DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DO CAMPUS ALTO PARA OPEBA**

Trabalho de Contextualização e Integração Curricular apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei como requisito obrigatório à obtenção do título de bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Emmanuel Kennedy da Costa
Teixeira

Ouro Branco, Minas Gerais

2016

Sumário

1	Introdução.....	3
2	Objetivos.....	5
2.1	Objetivo geral	5
2.2	Objetivos específicos	5
3	Referencial teórico.....	6
3.1	Forças hidrostáticas sobre superfícies planas submersas	6
3.1.1	Equilíbrio de corpos flutuantes.....	6
3.1.2	Estabilidade vertical.....	7
3.1.3	Estabilidade à rotação	7
3.1.4	Corpo parcialmente submerso em equilíbrio	8
3.1.5	Periodicidade	10
3.2	Medidores de vazão.....	11
3.2.1	Medição de vazão por pressão diferencial	12
3.2.2	O manômetro e a equação manométrica	12
3.2.3	O tubo de Venturi.....	14
3.2.4	O tubo de Pitot.....	18
3.3	Carneiro hidráulico	19
3.3.1	Princípio de funcionamento	19
4	Metodologia	22
4.1	Equilíbrio de corpos flutuantes	22
4.2	Medidores de vazão	25
4.3	Carneiro hidráulico	30
5	Resultados.....	31
5.1	Equilíbrio de corpos flutuantes	31
5.2	Medidores de vazão	32
6	Considerações finais.....	35
7	Referências bibliográficas.....	37
	APÊNDICE A – Roteiro: Equilíbrio de Corpos Flutuantes	39
	APÊNDICE B – Roteiro: Medidores de Vazão	46
	APÊNDICE C – Roteiro: Carneiro Hidráulico	55

1 Introdução

A Engenharia Civil é essencial à sociedade. O desenvolvimento de edifícios, estradas, pontes, barragens, sistemas de abastecimento e tantas outras obras só é possível devido a essa ciência, a qual compreende seis grandes áreas do conhecimento: estruturas; materiais e construção civil; hidráulica e recursos hídricos; geotecnia; transporte; saneamento e meio ambiente.

Dentro do campo de hidráulica e recursos hídricos, o estudo da Mecânica dos Fluidos é de extrema relevância. Descrita por Çengel e Cimbala (2007) como “a ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso (estática dos fluidos) ou em movimento (dinâmica dos fluidos) e da interação entre fluidos e sólidos ou outros fluidos nas fronteiras”, a mecânica dos fluidos é a base para o aprendizado de todo o conhecimento da área.

Segundo o projeto pedagógico do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, a unidade curricular de Mecânica dos Fluidos é ministrada no quarto período da graduação, compreendendo uma carga horária total de 72 horas, sendo 54 destas destinadas a aulas teóricas e o restante a aulas práticas.

Atualmente, a quantidade de aulas práticas ministradas a este curso é inferior à carga horária prevista de 18 horas. Dessa forma, parte do conteúdo teórico não é apresentado aos estudantes em laboratório.

As aulas práticas de uma disciplina são essenciais à compreensão e absorção do conteúdo apresentado em aulas teóricas. Para tanto, devem ser constituídas de experimentos que permitam uma nítida associação do aluno ao conteúdo apresentado, descritos por meio de roteiros claros e objetivos.

Tendo em vista a importância da Mecânica dos Fluidos para a formação de engenheiros civis e de aulas práticas para o aprendizado, o estudo em questão visa aumentar em quantidade e em qualidade as aulas práticas desta disciplina ministradas ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, através do aprimoramento de

práticas e roteiros já existentes e criação de novas práticas com seus respectivos roteiros.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Adaptar e desenvolver novos roteiros didáticos para as aulas práticas da disciplina Mecânica dos Fluidos do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus Alto Paraopeba*.

2.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo principal, alguns objetivos específicos são traçados:

- Analisar os atuais roteiros da disciplina em questão, levantando falhas que ocorrem no desenvolvimento das práticas e buscando soluções;
- Elaborar novos experimentos com o material disponível no laboratório, bem como escrever os seus roteiros de aulas práticas.

3 Referencial teórico

As 18 horas práticas exigidas pelo projeto pedagógico devem ocorrer da maneira mais ampla possível, isto é, é essencial que se abranja em laboratório o máximo conteúdo possível daquele visto nas aulas teóricas. Neste contexto, os roteiros a serem adaptados e criados no projeto em questão abordam os conteúdos de forças hidrostáticas em superfícies planas submersas e medidores de vazão, além de introduzir a abordagem do carneiro hidráulico nas aulas práticas.

3.1 Forças hidrostáticas sobre superfícies planas submersas

3.1.1 Equilíbrio de corpos flutuantes

Na estática dos fluidos a única tensão atuante é a tensão normal, representada pela pressão, e sua variação depende apenas do peso próprio do fluido. Isto ocorre visto que não existe movimento entre as camadas de fluido, o que elimina a tensão de cisalhamento. Uma aplicação dessa área se dá na determinação das forças que atuam sobre corpos submersos e flutuantes (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

Para que um corpo flutue é necessário que seu peso específico seja menor que o peso específico do líquido em que se encontra o objeto. Este fato é explicado pelo princípio do empuxo, cujo ponto de aplicação é denominado de centro de carena (CC) e sua localização se dá no centro de gravidade (CG) da parte submersa do corpo. O centro de gravidade, por sua vez, é o ponto de aplicação da força peso (G). O empuxo e a força peso são as forças que atuam sobre um corpo total ou parcialmente submerso.

Aplicando-se uma força qualquer sobre um corpo em equilíbrio, após cessar a aplicação desta força é possível verificar três formas de comportamento do corpo. O objeto pode: retornar à sua posição inicial (equilíbrio estável); afastar-se cada vez mais da sua posição inicial (equilíbrio instável); ou permanecer na nova posição (equilíbrio indiferente).

3.1.2 Estabilidade vertical

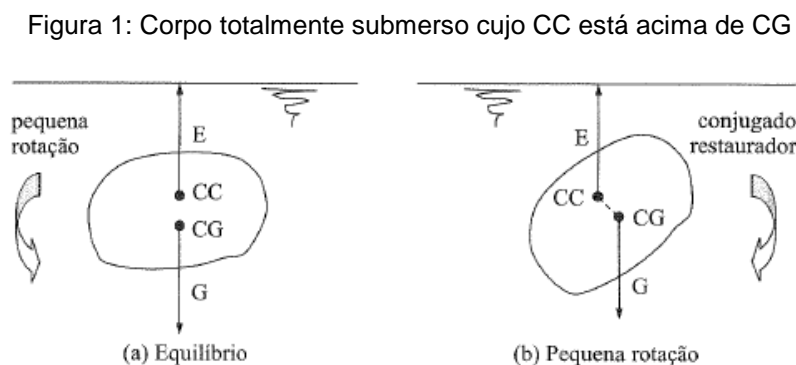
A estabilidade vertical de um corpo é analisada em duas situações diferentes. A primeira delas é para o caso em que o corpo está totalmente submerso, e a outra para o caso em que o corpo está parcialmente submerso.

Para um corpo totalmente submerso, o volume deslocado será o mesmo sempre e, dado que o empuxo e a força peso não irão variar, trata-se de um equilíbrio indiferente. Já para um corpo parcialmente submerso, o equilíbrio é sempre estável. Isto acontece, pois aplicando-se uma força sobre o corpo de cima para baixo, o empuxo e o volume de carena aumentam, fazendo com que o empuxo seja maior que a força peso. Entretanto, cessando-se tal aplicação, o corpo sobe provocando uma diminuição do empuxo até que este se iguale à força peso, na posição inicial.

3.1.3 Estabilidade à rotação

Para a estabilidade à rotação também são analisados os casos para corpos parcialmente e totalmente submersos.

Inicialmente, para corpos totalmente submersos verifica-se três situações distintas. Quando o centro de carena (CC) está acima do centro de gravidade (CG), uma rotação qualquer provoca um momento restaurador e o corpo está em equilíbrio estável, conforme Figura 1.

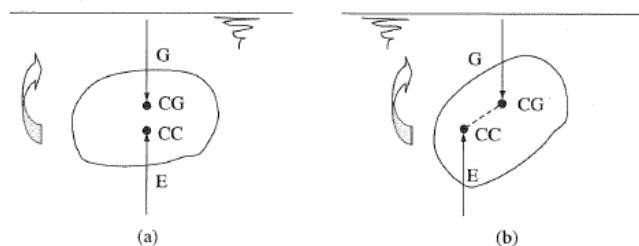


Fonte: BRUNETTI, 2008, p.39.

Outro caso, em que o centro de gravidade (CG) está acima do centro de carena (CC), uma rotação irá provocar um momento que irá aumentar a rotação, o que caracteriza um equilíbrio instável, conforme Figura 2.

Por fim, para o caso em que o centro de carena (CC) coincide com o centro de gravidade (CG), o equilíbrio é indiferente. Esta situação ocorre sempre que a massa específica do corpo submerso é constante em toda sua extensão.

Figura 2: Corpo totalmente submerso cujo CG está acima de CC

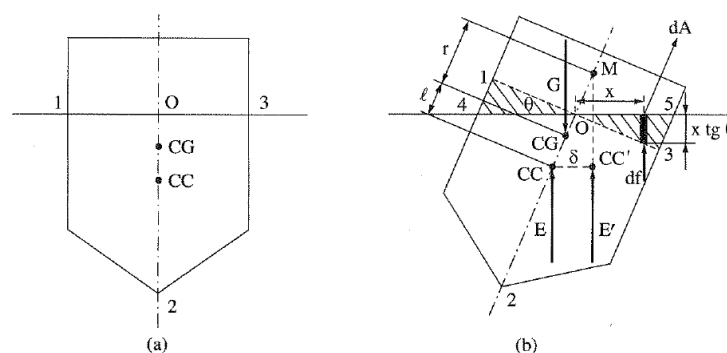


Fonte: BRUNETTI, 2008, p.39.

3.1.4 Corpo parcialmente submerso em equilíbrio

Um corpo parcialmente submerso sempre estará em equilíbrio se o seu centro de gravidade estiver abaixo do centro de carena. Entretanto, caso o centro de gravidade esteja acima do centro de carena, o corpo poderá também estar em equilíbrio. Isto ocorre pois, com o giro do corpo, o centro de carena movimenta-se e gera um momento restaurador, conforme Figura 3.

Figura 3: Estabilidade de um corpo parcialmente submerso



Fonte: BRUNETTI, 2008, p.40.

O equilíbrio de um corpo parcialmente submerso está condicionado ao seu centro de gravidade estar na mesma linha vertical que seu centro de carena. Sabendo-se que o centro de gravidade não varia quando o corpo é rotacionado, o que pode sofrer alterações devido a oscilações é o centro de carena. O ângulo θ representado na Figura 3b indica o possível ângulo de elevação ou declinação que o corpo pode sofrer e o novo centro de carena, após a rotação, pode ser expresso por CC' .

O metacentro (ponto M) é obtido a partir do prolongamento da linha de ação de E' em CC' e a distância r , entre o metacentro e o centro de gravidade, é a medida de estabilidade de flutuação. A posição do metacentro em relação ao centro de gravidade determina se o equilíbrio é estável, instável ou indiferente. Se o ponto M estiver acima do CG, o equilíbrio é estável; se estiver abaixo de CG, o equilíbrio é instável; se M estiver em CG, o equilíbrio é indiferente. Quanto mais acima do centro de gravidade estiver o metacentro, maior será a estabilidade.

Tendo o corpo flutuante girado de um ângulo (θ) pequeno em torno do eixo de rotação O, nota-se que o volume de carena alterou-se de V_{123} para V_{425} , fazendo com que CC se desloque para CC' . No entanto, o empuxo E é igual ao E' , já que o volume, apesar de mudar de forma, é o mesmo. Aplicando o equilíbrio dos momentos, chega-se na Equação 1:

$$r = \frac{\gamma I}{G} - l = \frac{I}{V} - l \quad \text{Equação 1}$$

Sendo " γ " o peso específico do líquido, " I " o momento de inércia da área da seção de flutuação em relação ao eixo y, " G " o peso do corpo flutuante e " V " o volume submerso do corpo.

Assim, a estabilidade será aumentada diminuindo a distância entre o CC e o CG e, portanto, abaixando o CG ou aumentando $\gamma I/G$, ou seja, aumentando o momento de inércia da seção de flutuação.

Para o trabalho em questão, o manual do equipamento H314 Hidrostática e Propriedades dos Fluidos da TecEquipment expõe a Equação 2 como forma

própria de calcular a altura metacêntrica r . O aparelho possibilita a realização de alguns experimentos e de algumas demonstrações de princípios básicos da Mecânica dos Fluidos e das propriedades dos fluidos. Dentre estas propriedades destacam-se os tópicos de densidade, viscosidade, tensão superficial e os princípios das Leis de Pascal e de Arquimedes.

$$r = \frac{m}{W} \frac{dx}{\theta} \quad \text{Equação 2}$$

3.1.5 Periodicidade

Um corpo flutuante estável oscila em torno de sua posição normal com certo tempo periódico quando é deslocado. Nesse caso, a única força atuante é o momento de restauração, dado pela Equação 3:

$$M = WBM \sin \theta \quad \text{Equação 3}$$

Em que W é o peso do corpo, BM é a altura metacêntrica e θ é o ângulo formado pelo deslocamento do corpo. Partindo deste princípio, chega-se na Equação 4:

$$T = 2\pi \frac{I}{W * BM} \quad \text{Equação 4}$$

Em que T é o tempo de oscilação e I corresponde ao momento de inércia desta área.

Outra maneira de chegar ao tempo de oscilação envolve o raio de giração K (BANSAL, 2005). Matematicamente, raio de giração é a relação entre momento de inércia e área de superfície, conforme a Equação 5:

$$K = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \text{Equação 5}$$

O momento de inércia também pode ser definido conforme a Equação 6:

$$I = \frac{W}{g} * K^2 \quad \text{Equação 6}$$

Substituindo na Equação 4, temos a Equação 7 com o tempo em função do raio de giração:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K^2}{g * BM}} \quad \text{Equação 7}$$

3.2 Medidores de vazão

Os medidores de vazão são utilizados na determinação do volume de fluido que passa em uma seção.

A escolha de um instrumento apropriado para medição de vazão depende de vários fatores. Dentre eles, pode-se destacar a exatidão desejada na medição, o tipo de fluido a ser medido (líquido ou gás, sujo ou limpo, número de fases, etc.), condições termodinâmicas, como níveis e faixa de pressão e temperatura nos quais o medidor deve atuar, espaço físico disponível e o custo.

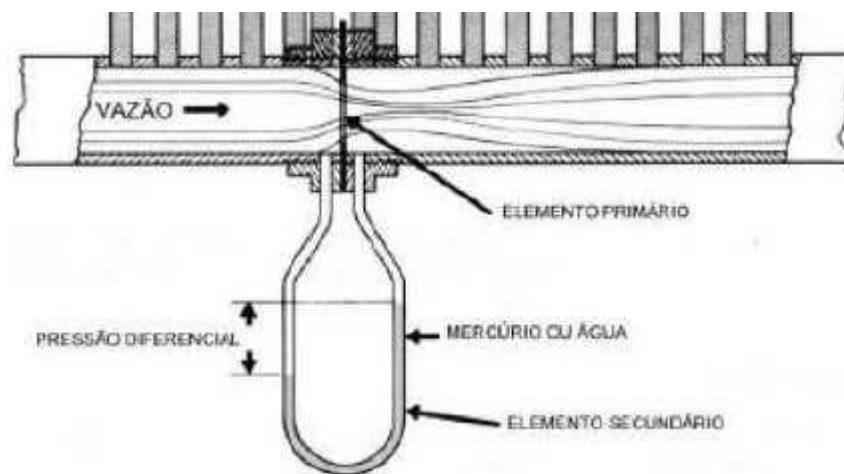
Os tipos de medidores podem ser classificados, resumidamente, em: medidores indiretos, utilizando fenômenos intimamente relacionados a quantidade de fluido passante, como manômetro U, Tubo de Venturi, Tubo de Dali, Tubo de Pitot, Placa de orifício e Rotâmetro; medidores diretos de volume do fluido passante, como Disco Nutante, Pistão Flutuante, Rodas Ovais, Tipo Hélice e Tipo Turbina; e medidores especiais, como por Eletromagnetismo, Vortex, ultra-sônico e Coriolis.

3.2.1 Medição de vazão por pressão diferencial

Considerando-se uma tubulação com um fluido passante, chama-se perda de carga dessa tubulação a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessá-la. As causas da perda de carga são: atrito entre o fluido e a parede interna do tubo, mudança de pressão e velocidade devido a uma curva ou um obstáculo, entre outros.

Os diversos medidores de perda de carga variável usam diferentes tipos de obstáculos ao fluxo, que tem como função aumentar a velocidade do fluido diminuindo a área da seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão. Na Figura 4 é possível observar a variação da pressão (queda) que ocorreu devido a uma obstrução. Relacionando essa perda de pressão com a vazão, determina-se a vazão desejada.

Figura 4: Queda de pressão devido à uma obstrução (tudo de Venturi)



Fonte: <http://docplayer.com.br/12685040-Vazao-ou-fluxo-quantidade-de-fluido-liquido-gas-ou-vapor-que-passa-pela-secao-reta-de-um-duto-por-unidade-de-tempo.html> (2016).

3.2.2 O manômetro e a equação manométrica

O manômetro é um dispositivo que se baseia no princípio de que a variação da elevação Δz em um fluido em repouso corresponde a $\Delta P/\rho g$, o que sugere que uma coluna de fluido pode ser usada para medir diferenças de

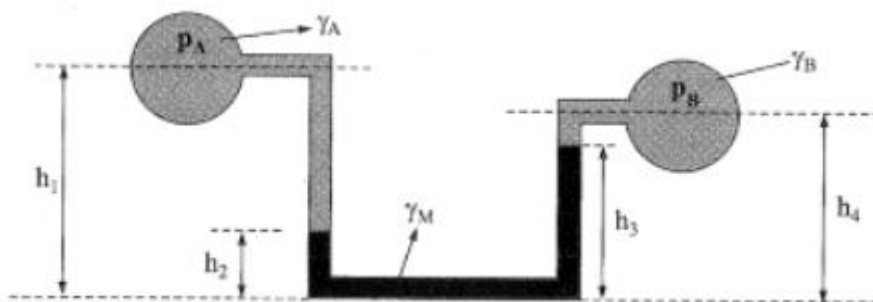
pressão. Este dispositivo é normalmente utilizado para medir diferenças de pressão pequenas e moderadas (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

Um manômetro consiste principalmente em um tubo em forma de U, de vidro ou plástico, contendo um ou mais fluidos como mercúrio, água, álcool ou óleo. Quando se prevê diferenças de pressão elevadas, fluidos pesados como o mercúrio são usados, o que mantém o tamanho do manômetro em um nível gerenciável.

A equação manométrica é a expressão que permite, por meio do manômetro, determinar a pressão de um reservatório ou a diferença de pressão entre dois reservatórios.

Seja o manômetro da Figura 5, pode-se calcular a pressão no fundo dos dois ramos. Pelo Teorema de Stevin, e lembrando que, segundo Pascal, a pressão se transmite integralmente a todos os pontos do fluido, tem-se as relações abaixo:

Figura 5: Representação de um manômetro



Fonte: BRUNETTI, 2008, p.28.

A pressão no fundo do ramo esquerdo consta na Equação 8.

$$p_{fe} = p_A + \gamma_A (h_1 - h_2) + \gamma_M h_2 \quad \text{Equação 8}$$

A pressão no fundo do ramo direito consta na Equação 9.

$$p_{fd} = p_B + \gamma_B (h_4 - h_3) + \gamma_M h_3 \quad \text{Equação 9}$$

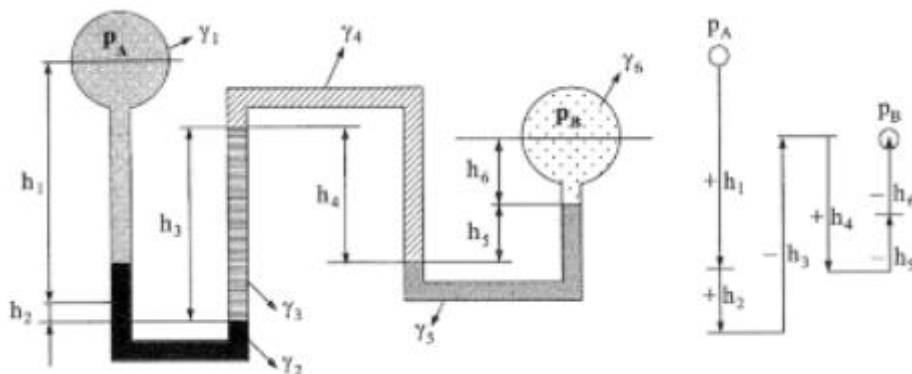
Como o fluido está em equilíbrio, então a pressão no mesmo nível deve ser a mesma. Portanto, forma-se a Equação 10.

$$p_A + \gamma_A(h_1 - h_2) + \gamma_M h_2 = p_B + \gamma_B(h_4 - h_3) + \gamma_M h_3 \quad \text{Equação 10}$$

Nota-se que cada peso específico aparece multiplicado pela respectiva altura da coluna, sem necessidade de adotar como referência o fundo. Com base nisso, tem-se como regra prática a definição de que, começando do lado esquerdo, soma-se à pressão p_A a pressão das colunas descendentes e subtrai-se àquela das colunas ascendentes. As cotas são sempre dadas até a superfície de separação de dois fluidos do manômetro. Assim sendo, analisando a Figura 6, chega-se à Equação 11.

$$p_A + \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_3 h_3 + \gamma_4 h_4 - \gamma_5 h_5 - \gamma_6 h_6 = p_B \quad \text{Equação 11}$$

Figura 6: Leitura para equação manométrica



Fonte: BRUNETTI, 2008, p.29.

3.2.3 O tubo de Venturi

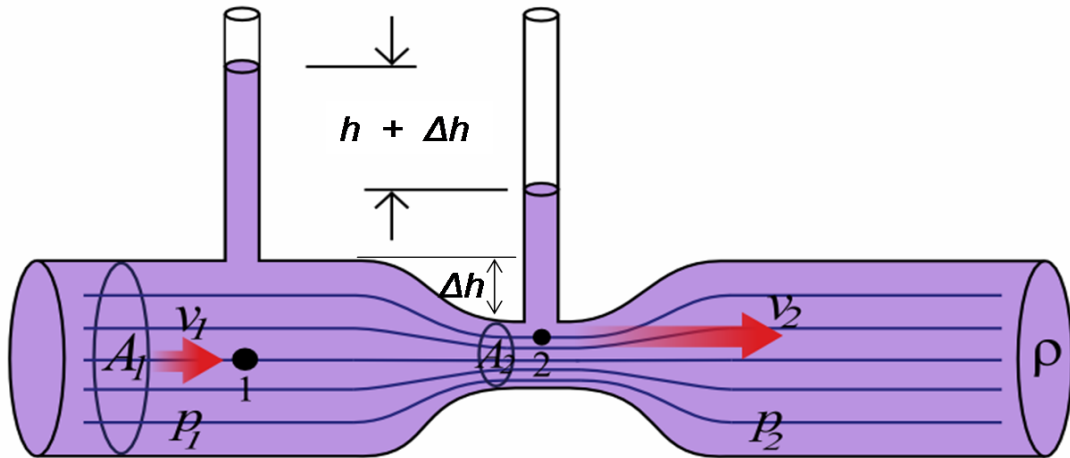
O tubo de Venturi é um aparato criado por Giovanni Battista Venturi para medir a velocidade do escoamento e a vazão de um líquido incompressível através da variação da pressão durante a passagem do fluido por um tubo de

seção mais larga e depois por outro de seção mais estreita. Seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática. Assim, com o auxílio de um medidor de pressão, pode-se ter uma relação da altura da coluna de água deslocada com a vazão. Este tipo de medidor apresenta o melhor desempenho entre os medidores de obstrução, tendo a menor perda de carga durante a medição. A perda de carga é menor, pois não ocorre a separação de uma camada de fluido turbulenta, como ocorre, por exemplo, na placa de orifício.

O medidor Venturi é constituído de uma seção a montante do mesmo diâmetro do conduto, que através de uma seção cônica convergente (ângulo geralmente de 20 a 30°) o leva a uma seção mínima, garganta do Venturi, e através de uma seção cônica divergente, retorna gradualmente ao diâmetro do conduto. O difusor cônico divergente gradual à jusante da garganta fornece excelente recuperação da pressão. Isto garante uma pequena perda de carga neste tipo de aparelho. A especificação de um medidor Venturi é feita pelos diâmetros do conduto e da garganta, sendo que este último deve ser projetado para propiciar uma pressão (pressão mínima) maior que a pressão de vapor do fluido que escoar, evitando desta forma que o mesmo vaporize na temperatura do escoamento, o que caracterizaria o fenômeno denominado de cavitação.

Visto que a contração de área originará um aumento da carga cinética e, conseqüentemente, diminuição da carga de pressão, pode-se comprovar tal afirmação com a aplicação da Equação de Bernoulli (Equação 12 e Equação 13), da Equação da Continuidade e da Equação Manométrica. Para tal, é preciso considerar o fluido como ideal e aplicar a Equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, em que o ponto 1 está à montante do estrangulamento e o ponto 2 está no estrangulamento, na seção do diâmetro menor (vide Figura 7).

Figura 7: O tubo de Venturi



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Venturi (2016).

$$H_1 = H_2 \quad \text{Equação 12}$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Equação 13}$$

Como o medidor é instalado no plano horizontal, a carga potencial (Z) é constante, chegando-se a Equação 14.

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g - \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad \text{Equação 14}$$

Pela Equação da Continuidade aplicada a um escoamento incompressível e permanente, considerando A_2 igual à área da garganta, tem-se a Equação 15 e a Equação 16.

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad \text{Equação 15}$$

$$v_1 = v_2 \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad \text{Equação 16}$$

Substituindo a Equação 16 na Equação 14, tem-se a Equação 17.

$$v_2^2 - v_2^2 \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} \right) = 2g - \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad \text{Equação 17}$$

Através de um manômetro em U instalado entre as seções 1 e 2 da Figura 7 tem-se a Equação 18.

$$P_1 - P_2 = h \times (\gamma_m - \gamma) \quad \text{Equação 18}$$

Substituindo a Equação 18 na Equação 17, forma-se a Equação 19.

$$v_2 = \frac{\sqrt{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)}}{1 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4} \quad \text{Equação 19}$$

Dado que a vazão é igual à velocidade multiplicada pela área e que a velocidade v_2 é a velocidade teórica, a vazão que passa pelo estrangulamento é determinada pela equação 20.

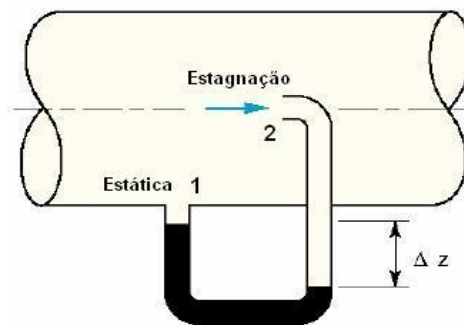
$$Q_{real} = C_v A_2 \times \frac{\sqrt{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma} \right)}}{1 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4} \quad \text{Equação 20}$$

Em que C_v é o coeficiente de velocidade, usado para corrigir a velocidade teórica e transformá-la na velocidade real.

3.2.4 O tubo de Pitot

O tubo de Pitot é um instrumento de medição que mede a velocidade de fluidos em modelos físicos em laboratórios de hidráulica, em laboratórios de aerodinâmica e também na hidrologia para a medição indireta de vazões em canais e rios, em redes de abastecimento de água, em adutoras, em oleodutos e ainda a velocidade dos aviões, medindo a velocidade de escoamento do ar. É um tubo aberto dirigido contra a corrente do fluido que indica a pressão total, conforme visto na Figura 8. A pressão total corresponde à soma das pressões estática (aquela que é obtida perpendicularmente ao escoamento) e dinâmica (determinada pela transformação da energia cinética em carga de pressão).

Figura 8: Tubo de Pitot em uma tubulação



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAE2AAE/distribuicao-velocidades> (2016).

Com base no valor da velocidade de escoamento em uma tubulação, é possível determinar a vazão que passa pelo conduto. Para isso é necessário relacionar as equações manométrica e de Bernoulli. Aplicando-se a Equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 (veja Figura 8), tem-se a Equação 21 e, isolando v_1 , chega-se na Equação 22.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} \quad \text{Equação 21}$$

$$v_1 = \sqrt{2g \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)} \quad \text{Equação 22}$$

Aplicando-se a equação do manômetro diferencial tem-se a Equação 23.

$$P_1 + \gamma_1 h' + \gamma_2 h = P_2 + \gamma_1 (h + h') \quad \text{Equação 23}$$

Relacionando a Equação 22 e a Equação 23 chega-se na Equação 24.

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad \text{Equação 24}$$

Determinado o valor da velocidade através da equação acima e tendo conhecimento da área da tubulação, determina-se então o valor da vazão.

3.3 Carneiro hidráulico

Também conhecido como aríete hidráulico, o carneiro hidráulico é um aparelho utilizado para elevar água por meio da própria energia hidráulica, desde que haja uma diferença de altura que possibilite que parte da água aduzida pelo carneiro conceda sua energia à outra parte de água que será elevada. Este dispositivo foi inventado em 1776 pelos irmãos Montgolfier e só eleva de 10 a 30% da vazão aduzida (DENICULI e SILVA, 20--).

3.3.1 Princípio de funcionamento

Baseado na elevação de pressão num conduto, o funcionamento do carneiro hidráulico ocorre quando a coluna líquida em movimento é interceptada bruscamente, o que é conhecido como golpe de aríete, e faz com que parte da água seja elevada.

O funcionamento se inicia com a abertura da válvula de escapamento, o que proporciona a descida da água pelo tubo de alimentação. O empuxo que age sobre a válvula faz com que ela se feche e assim a massa de água que estava em movimento sofre uma parada brusca. Dessa maneira, a energia cinética é convertida em carga de pressão no tubo de alimentação, fazendo com que a válvula de recalque se abra e a água penetre na campânula. Isto alivia a pressão no interior do tubo de alimentação e faz com que a válvula de escapamento se abra, fechando o ciclo.

Ao penetrar na campânula, a água comprime o ar contido nela. Através do princípio de ação e reação, o ar empurra a água elevando-a até o reservatório superior. Para que isso ocorra, é necessário que a pressão na campânula seja superior à altura de elevação e que o golpe de aríete seja superior à pressão na campânula.

A fim de que a fração de água que desce pela tubulação seja elevada a cotas maiores que as do reservatório, é necessário que haja um aumento no seu estado de energia. Para tal, a fração de água elevada recebe energia que é cedida pela outra fração de água, através de algumas transformações durante o funcionamento do carneiro.

Inicialmente, há uma conversão de energia potencial em energia cinética quando ocorre a abertura da válvula de escapamento. Depois, quando a válvula se fecha, esta energia cinética é transformada em carga de pressão. Por fim, quando o ar empurra a água provocando sua elevação no tubo de recalque, a carga de pressão é então convertida em uma nova energia potencial.

A potência de uma queda d'água (P) é dada pela relação entre o peso específico do líquido (λ) a vazão (Q) e a queda d'água (h), representada pela Equação 25.

$$P = \lambda Q h \quad \text{Equação 25}$$

Esta queda tem a capacidade de elevar uma vazão menor (q) a uma elevação maior (H), dada pela Equação 26.

$$P = \lambda qH$$

Equação 26

Igualando as equações acima e considerando também o rendimento da máquina (R), tem-se a Equação 27.

$$QhR = qH$$

Equação 27

A quantidade de água aproveitada, (q), será função do tamanho do carneiro e da relação entre a queda disponível e a altura de recalque. (h/H). (CENTRO UNIVERSITARIO DE SETE LAGOAS, 2013)

A Tabela 1 fornece o rendimento do carneiro hidráulico em função da relação h/H para condições ótimas de instalação e ajustamento da válvula.

Tabela 1: Relação entre rendimento e h/H

Relação h/H	Rendimento (%)
1:2	80
1:3	75
1:4	70
1:5	65
1:6	60
1:7	55
1:8	50

Fonte: <http://docplayer.com.br/10064552-Aula-pratica-9-carneiro-hidraulico.html> (2016).

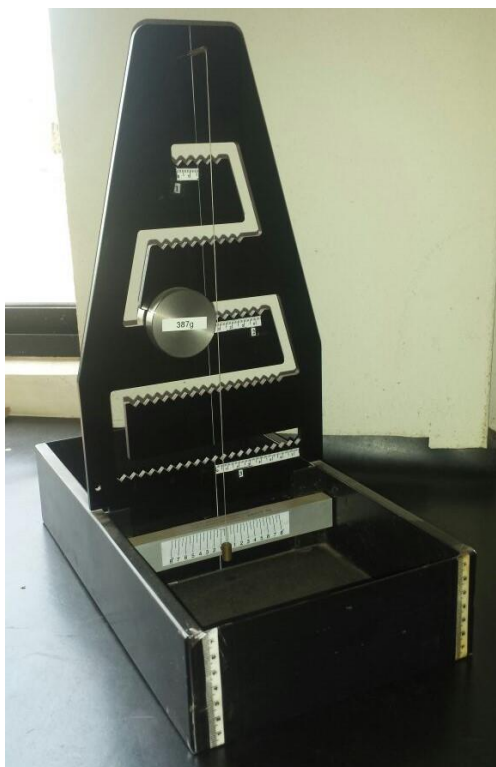
4 Metodologia

O projeto envolveu esforços em três temas distintos. O equilíbrio de corpos flutuantes foi o primeiro assunto abordado, sendo esta uma aula prática já existente na ementa da disciplina cuja execução se buscava ajustar da mesma. Posteriormente, foi proposta a criação de mais duas atividades laboratoriais que envolviam a medição de vazão e o uso de um carneiro hidráulico.

4.1 Equilíbrio de corpos flutuantes

O experimento objetiva determinar a posição do centro de carena, do centro de gravidade e do metacentro de um equipamento de flutuabilidade, no caso um barco, representado pela Figura 9, através das Equações 1 e 2. Para tanto, o peso ajustável foi movido no aparato até uma posição qualquer, sendo lido o valor do ângulo θ pela régua existente na parte inferior do mesmo, além da distância dx entre o eixo de simetria e o pêndulo. Essa liberdade durante a leitura dos dados permite com que o estudante adote inúmeros valores, o que diminui a veracidade das informações coletadas. Outro ponto negativo acontece na inexistência de comparações entre valores lidos com valores calculados, fundamental em aulas práticas.

Figura 9: Plataforma flutuante utilizada no experimento de equilíbrio de corpos flutuantes



Em um primeiro momento, foi feita a leitura do manual do equipamento disponibilizado pela fornecedora do aparato, a Nova Didacta. Essa análise evidenciou alguns erros no roteiro existente, além de possibilitar sugestões para melhorar o experimento:

- A Equação 2 do roteiro existente estava diferente àquela expressa no manual do equipamento, visto que a massa total do aparato W e a massa do peso ajustável m estavam em posições trocadas;
- Adotou-se que as variáveis dx e θ seriam inseridas na Equação 2 com a unidade padrão indicada no Sistema Internacional, eliminando as incertezas trazidas pela não especificação clara do manual das unidades a serem adotadas e a consequente incoerência de unidades;
- O momento de inércia I da Equação 1 indicado no antigo roteiro se referia a área de seção submersa com relação ao eixo de rotação O . Entretanto, é correto calcular o momento de inércia I da área da seção submersa em planta em relação ao eixo de rotação O . Com

esta modificação, o valor da largura b da equação do momento de inércia será $20 \times \cos\theta$;

- A distância dx era a distância medida entre o eixo de simetria e a posição do pêndulo. Com a análise do manual, chegou-se a conclusão que essa distância é, na verdade, entre o eixo de simetria e o peso ajustável;
- Para facilitar as leituras de dados e diminuir os erros, foram coladas réguas graduadas no barco, além de números especificando os pontos a serem lidos, conforme Figura 9.
- Por fim, idealizou-se relacionar a periodicidade de corpo flutuante ao aparato para tornar o experimento mais prático, corrigindo o problema da inexistência de comparações entre valores lidos com calculados. A ideia era coletar o tempo que o barco necessitaria para alcançar a estabilidade e calculá-lo através da Equação 4, também encontrada no manual.

Após as modificações, o experimento foi realizado e os cálculos da periodicidade evidenciaram valores de tempo muito pequenos, na ordem de 10-3 segundos, enquanto os valores lidos giravam em torno de 30 segundos.

Diante do impasse, entrou-se em contato com o fabricante para esclarecimento das causas de tamanha discrepância de resultados e o retorno do mesmo forneceu uma série de informações relevantes que redirecionaram o andamento das atividades. Ficou claro na forma exposta por eles que o barco em questão funciona como uma representação de um barco real, simulando a construção deste.

A Equação 4 envolve o momento de inércia, o peso e o metacentro. Como a plataforma possui uma placa vertical onde se pode colocar o peso em diversas alturas e distâncias com relação ao centro e as variáveis acima citadas utilizam de dados geométricos e da massa do cálculo coletados com essas modificações, desvios de medida dos mesmos influenciam significativamente os resultados. Aliado a isso, o tamanho reduzido da plataforma induz a desvios dos resultados teóricos. Como comparação, o fornecedor expôs que o tempo de oscilação de um barco real aproximava-se de

10 segundos enquanto do aparato esperava-se cerca de 1 segundo. Ainda sobre a Equação 4, constatou-se sua referência ao tempo de oscilação e não ao de estabilidade, conforme pensado anteriormente.

Outro ponto abordado pelo fornecedor é uma maneira diferente que o manual deduz a fórmula do tempo de periodicidade. A forma mais usual envolve o raio de giração K , conforme a Equação 7.

Apesar da proposta oferecida pelo fabricante para modificar a equação do cálculo da periodicidade, ficou decidido não acrescentar o tema de periodicidade no experimento. Isto porque a ideia em somar o tema no roteiro era relacionar o observado ao calculado; visto que o tempo de oscilação é em torno de 1 segundo, observá-lo é inviável.

Desse modo, concluiu-se a reformulação do roteiro, cujo modelo se encontra como APÊNDICE A.

4.2 Medidores de vazão

Com o objetivo de aproveitar o espaço físico disponível no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, e otimizar o tempo da aula prática de Mecânica dos Fluidos, criou-se um experimento que envolvesse a medição simultânea de vazão por três métodos diferentes. Para tanto, foi desenvolvido um aparato constituído por um tubo de Pitot (Figura 10) e um tubo de Venturi (Figura 11) conectados e, portanto, submetidos à uma mesma vazão.

Inicialmente, utilizou-se um tubo de Venturi formado por um diâmetro maior de 75 mm e diâmetro menor de 50 mm e um tubo de Pitot de diâmetro transversal de $\frac{3}{4}$ " , ambos os instrumentos e suas respectivas conexões de PVC. Os aparatos foram conectados entre si e entre os pontos de alimentação e descarga por mangueiras de $\frac{3}{8}$ ". A carga de pressão no tubo de Venturi seria medida por meio de um manômetro em U, ao passo que a carga de pressão do tubo de Pitot seria dada por meio da diferença de altura observada entre as duas mangueiras verticais. As mangueiras foram inseridas no tubo com uma

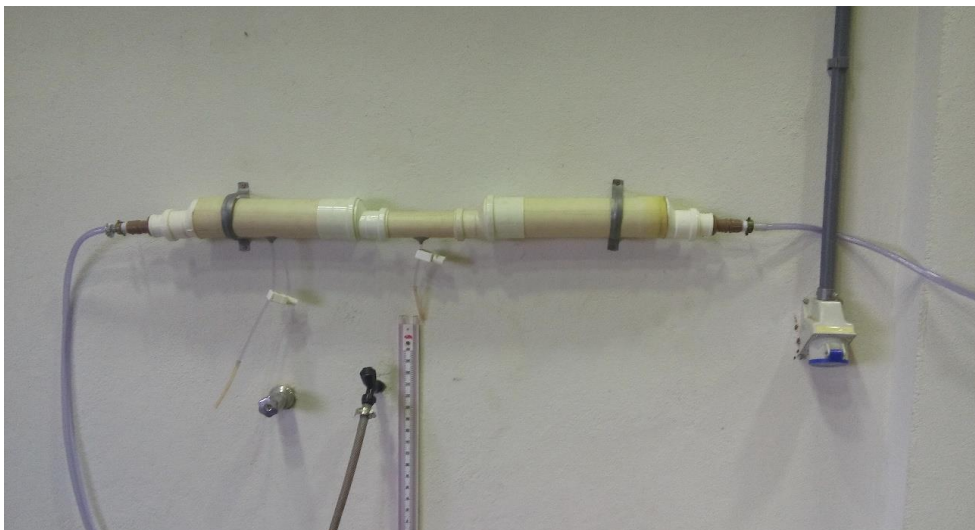
inclinação horizontal. As cargas de pressão encontradas seriam utilizadas para o cálculo da vazão.

Para facilitar a leitura das alturas nas mangueiras, fixou-se na parede duas réguas, graduadas em centímetros, cujas medições se iniciam na marcação 113 cm. O manômetro em U também foi fixado à parede, localizado na parte inferior do tubo de Venturi e ligado a ele através de mangueiras de diâmetro imediatamente inferior ao diâmetro do manômetro. O líquido manométrico utilizado foi o próprio do manômetro, de densidade relativa de 1000 kg/m^3 , sendo que ele foi adicionado ao tubo seguindo-se as orientações contidas no manual do fabricante.

Figura 10: Tubo de Pitot composto por tubulação transversal de diâmetro de $\frac{3}{4}$ " e mangueiras verticais acompanhadas de réguas milimetradas



Figura 11: Tubo de Venturi com diâmetros de 75 mm e 50 mm ligado ao manômetro em U



Após fixados os aparatos e conferidas as vedações entre as conexões, foram realizados vários experimentos. Em primeiro momento, o sistema foi alimentado por uma bomba, cuja instalação se encontrava próxima ao aparato. A descarga foi feita dentro de uma caixa d'água, também localizada nas proximidades. Para diferentes valores de vazão, verificou-se que a diferença entre as alturas d'água no tubo de Pitot ocorreu conforme previsto. No entanto, a deflexão do líquido manométrico foi contrária ao esperado, ou seja, foi notada uma altura maior no lado esquerdo do manômetro.

Com esse resultado, notou-se que o conjunto tubo de Venturi-manômetro não estava funcionando conforme esperado, pois, segundo a Equação de Energia (Equação 13), a pressão deveria ser menor no tubo de diâmetro inferior. Esse fato poderia ser ocasionado por presença de pressão atmosférica dentro do tubo de diâmetro superior, resultante de um não preenchimento completo deste tubo pelas vazões fornecidas pela bomba.

Buscando solucionar esse problema, utilizou-se como nova fonte de alimentação uma torneira localizada próxima ao sistema. Contudo, verificou-se o mesmo erro anterior. Assim, foi criado outro tubo de Venturi, de diâmetros $\frac{3}{4}$ " e $\frac{1}{2}$ " (tubos e conexões de PVC). Após a substituição dos aparatos, realizou-se novamente os experimentos, com os dois cenários de alimentação. Em ambos,

verificou-se que o manômetro não apresentava o funcionamento esperado, conforme identificado na Figura 12.

Figura 12: Tubo de Venturi com diâmetros de $\frac{3}{4}$ " e $\frac{1}{2}$ " conectado a um manômetro cujo líquido manométrico está defletido inversamente



Com o intuito de verificar se o problema de não preenchimento dos tubos pelas vazões testadas era existente no novo sistema, desconectou-se o tubo de Venturi do manômetro e girou-se este aparato num ângulo de 180° , de forma que as mangueiras ficassem viradas para cima. Ao submeter o sistema à uma vazão, notou-se extravasamento de água pelas mangueiras, mostrando que os tubos estavam sendo completamente preenchidos.

Após releitura do manual do fabricante do manômetro e teste com outros líquidos e ainda assim não se obter o funcionamento adequado do medidor, optou-se pela realização de modificações no experimento. Nesse novo cenário, as mangueiras do tubo de Venturi foram mantidas voltadas para cima, de modo a ser realizada a leitura das alturas da coluna d'água destas. Para facilitar a medição, foram instaladas réguas semelhantes às do tubo de Pitot, conforme indicado na Figura 13. As réguas foram colocadas de forma que o início de cada uma (113 cm) coincidissem com a linha central de seu respectivo tubo. Tal detalhe é imprescindível para garantir uma medição precisa.

Uma vez realizadas as modificações, submeteu-se o sistema a diferentes vazões fornecidas pela bomba. Observou-se que a nova configuração fornecia as diferenças de altura esperadas no tubo de Venturi. O mesmo foi repetido utilizando-se a torneira como alimentação, já que esta

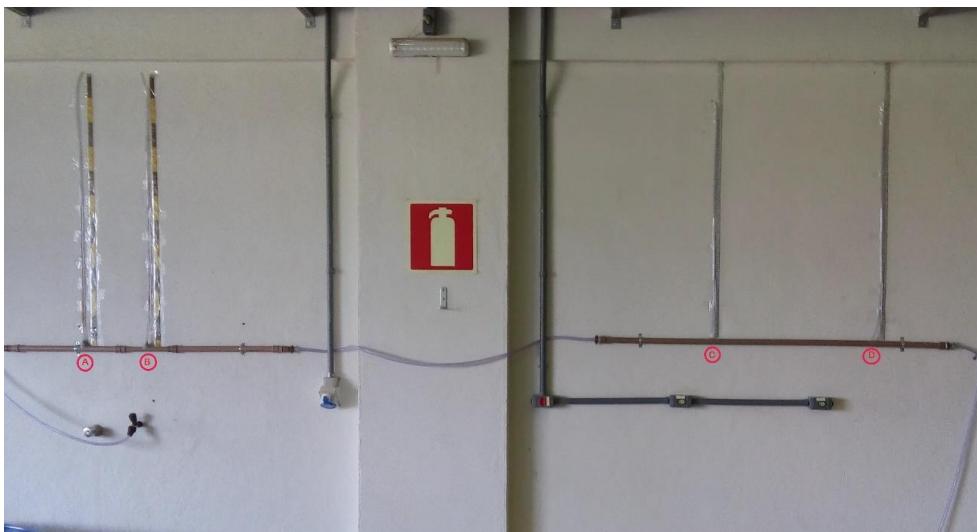
poderia ser mais facilmente manuseada por alunos. Nessa segunda situação, notou-se que a vazão apresentava oscilações, dificultando as leituras.

Figura 13: Tubo de Venturi com diâmetros de $\frac{3}{4}$ " e $\frac{1}{2}$ " conectado a mangueiras verticais acompanhadas de réguas milimetradas



Dessa maneira, estabeleceu-se que o experimento de medições de vazão a ser aplicado na aula prática de Mecânica dos Fluidos seria constituído pela torneira como fonte de alimentação e por três métodos de medição de vazão: pelo tubo de Venturi, onde é coletada a diferença de pressão entre os pontos A e B; pelo tubo de Pitot, no qual se coleta a diferença de pressão entre os pontos D e C (estes pontos são evidenciados na Figura 14); e pelo método direto gravimétrico, em que se coleta da massa de água no ponto de descarga em determinado intervalo de tempo. A descarga seria realizada na caixa d'água. As cargas cinéticas de cada ponto deveriam ser calculadas de acordo com seus respectivos diâmetros. O roteiro da prática se encontra no APÊNDICE B.

Figura 14: Sistema final com os medidores tubo de Venturi (à esquerda) e tubo de Pitot (à direita), com demarcações dos pontos de medições A, B, C e D



4.3 Carneiro hidráulico

Em um primeiro momento, esperava-se usar o carneiro hidráulico existente no laboratório e elaborar um novo experimento. Entretanto, a caixa d'água usada como fonte de alimentação foi alocada temporariamente para uso em outro laboratório, inviabilizando a montagem do aparato como um todo. Apesar do imprevisto, o roteiro para a aula prática foi escrito, conforme APÊNDICE C, restando analisar sua viabilidade.

5 Resultados

5.1 Equilíbrio de corpos flutuantes

Após a correção dos erros do relatório existente, o experimento foi realizado para verificar a coerência dos valores encontrados. Os dados coletados e os resultados obtidos para estes estão expostos nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2: Dados coletados durante o experimento da plataforma flutuante

Altura submersa inicial (cm)	Ângulo (°)	Ângulo (rad)	dx (cm)
3,4	6,5	0,1134	1,5
	7,3	0,1274	4,5
	3	0,0524	2,2

Tabela 3: Valores calculados para o experimento de equilíbrio de corpos flutuantes após as modificações na Equação 2 e no modo de cálculo do momento de inércia

Profundidade de CC (cm)	r (cm)	I (m ⁴)	I (cm)
1,7	1,964	2,354 x 10 ⁻⁴	7,066
	5,243	2,342 x 10 ⁻⁴	3,741
	6,232	2,390 x 10 ⁻⁴	2,936

A Tabela 4 apresenta os valores que seriam encontrados para os dados da Tabela 2 antes das modificações realizadas. É importantes ressaltar aqui que a distância dx era anteriormente usada em milímetros enquanto o ângulo θ em graus.

Tabela 4: Valores que seriam encontrados para o experimento de equilíbrio de corpos flutuantes para os dados da Tabela 2 antes das modificações propostas

Profundidade de CC (cm)	r (cm)	I (m ⁴)	I (cm)
	1,555	2,400 x 10 ⁻⁴	7,651
1,7	4,153	2,400 x 10 ⁻⁴	5,053
	4,940	2,400 x 10 ⁻⁴	4,266

Comparando-se os valores das Tabelas 3 e 4 para a distância (I) entre o centro de carena e o centro de gravidade, percebe-se que os resultados obtidos antes das modificações apresentam os erros relativos apresentados na Tabela 5. Assim, evidencia-se a melhora significativa que se obteve nos resultados dessa prática, devido às modificações propostas.

Tabela 5: Erros relativos no cálculo de I para os valores obtidos antes das modificações, utilizando-se como parâmetro os valores obtidos após as modificações

Ângulo (°)	dx (cm)	Erro relativo de I (%)
6,5	1,5	8,28
7,3	4,5	35,07
3,0	2,2	45,30

5.2 Medidores de vazão

Os dados coletados durante o experimento de medidores de vazão estão expostos nas Tabelas 6 a 8.

Tabela 6: Alturas coletadas no tubo de Venturi

Altura D ₁ (cm)	Altura D ₂ (cm)
59,9	58,8

Tabela 7: Alturas coletadas no tubo de Pitot

Alturas (cm)
23,4
23,0

Tabela 8: Dados de volume e tempo coletados para cálculo da vazão pelo método gravimétrico

Volume (mL)	Tempo (s)
200	3,21
220	3,48
215	3,49

Os valores de vazões calculados para o tubo de Venturi estão expostos na Tabela 9, enquanto os valores do tubo de Pitot se encontram na Tabela 10 e, por fim, o método gravimétrico fornece os dados da Tabela 9. É importante salientar que a perda de carga foi calculada pela Equação de Hazen-Williams com C igual a 145.

Tabela 9: Valores calculados de diferença de carga de pressão, velocidade e vazão obtidos pelo tubo de Venturi

$\frac{P_1 - P_2}{\gamma}$ (N/m ²)	V_2 (m/s)	Q (L/s)
0,011	0,5	0,0879

Tabela 4: Valores calculados de cargas de pressão, perda de carga e vazão obtidos pelo tubo de Pitot

$\frac{P_1}{\gamma}$ (N/m ²)	$\frac{P_2}{\gamma}$ (N/m ²)	h_T (m)	Q (L/s)
0,234	0,23	0,004	0,0729

Tabela 5: Valores de vazão e vazão média obtidos pelo método gravimétrico

Q (L/s)	Q _{med} (L/s)
0,0622	
0,0663	0,0634
0,0616	

Comparando-se os valores obtidos pelos três métodos, observa-se um desvio padrão de 0,0124 L/s e um coeficiente de variação de 16,6%. Dentre os fatores que explicam a diferença entre as vazões calculadas pode-se destacar, em um primeiro momento, a perda de carga entre os tubos de Venturi e Pitot em virtude da distância entre os medidores (cerca de 2,35 m) e a presença de peças especiais, como ampliadores e redutores. De um modo geral, as leituras ocorrem manualmente e a precisão depende do leitorista. As pequenas oscilações que ocorrem nos tubos de Venturi e Pitot dificultam a leitura nas régua milimetradas. Nesta mesma linha, outro fato suscetível a falhas é o método gravimétrico, em que se deve existir uma sintonia para a leitura dos valores de volume em função do tempo.

6 Considerações finais

O foco principal deste trabalho foi desenvolver melhorias nas aulas práticas da disciplina de Mecânica dos Fluidos por meio de adaptações em roteiros existentes e da criação de novos experimentos.

As mudanças realizadas no equipamento da prática de “Equilíbrio de corpos flutuantes” proporcionaram maior rapidez na leitura de dados, devido às régua milimetradas coladas no dispositivo e à marcação das posições em que os pesos devem ser colocados. Essas marcações auxiliarão tanto os alunos durante a prática, quanto o professor na correção dos relatórios, uma vez que se terá um resultado único como parâmetro de correção.

Ainda sobre esse tema, a análise do roteiro junto ao manual fornecido pelo fabricante do equipamento (Nova Didacta) tornou viável sua correção, proporcionando maior coerência e precisão nos cálculos. Isto pode ser claramente observado pela diferença entre os resultados obtidos antes e após as correções, para um mesmo conjunto de dados. Utilizando-se como parâmetro os resultados após as modificações, percebe-se que a distância l era calculada com erros relativos de proporções consideráveis, cujo valor chega a 45,3% para o ângulo de três graus.

Quanto à proposta inicial de relacionar algo observado ao calculado, esta não foi alcançada principalmente devido ao fato do aparato em questão envolver equações próprias, restringindo a possibilidade de modificações e de relacionar equações externas referentes ao conteúdo teórico.

No que diz respeito ao experimento criado “Medidores de vazão”, observa-se que, apesar da inviabilidade de medição de vazão no tubo de Venturi pelo manômetro em U como inicialmente proposto, o objetivo principal de obtenção da vazão por diferentes métodos foi atendido, uma vez que esta pode ser medida utilizando-se um tubo de Venturi (após a modificação do manômetro), um tubo de Pitot e pelo método gravimétrico.

Os valores obtidos nesse experimento apresentaram um coeficiente de variação inferior a 20% (16,6%), indicando uma boa homogeneidade dos dados e a conseqüente viabilidade de comparação dos resultados pelos alunos.

Devido à inviabilidade do uso do carneiro hidráulico, criou-se apenas o roteiro baseado neste equipamento, não tendo sido feitos testes com ele.

O trabalho desenvolvido atendeu às expectativas, gerando resultados satisfatórios e indicando possibilidade de continuação destes estudos. A exemplo disso, a realização de testes para o roteiro da aula prática com o uso do carneiro hidráulico, quando este estiver disponível, é um fator considerável.

7 Referências bibliográficas

BANSAL, Dr. R.K. *A Text Book of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines*. [S.l.]: Laxmi Publications, 2005. 381 p.

BRUNETTI, Franco. *Mecânica dos Fluidos*. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice, 2008. 420 p.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: AMGH Editora, 2007. 821p.

CENTRO UNIVERSITARIO DE SETE LAGOAS. Relatório da aula prática do curso de Engenharia de Produção – Mecânica, da Unidade Acadêmica de Ensino de Ciências Gerenciais, do Centro Universitário de Sete Lagoas-UNIFEMM, da disciplina Sistemas Fluidos-Mecânicos. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFvBQAJ/carneiro-hidraulico-relatorio>>. Acesso em: 12 nov. 2016

DENICULI, Wilson; SILVA, Demetrius David da. *Instalações de Recalque*. Viçosa: [s.n], [20--]. 105 p.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA. Aula Prática 9, Carneiro Hidráulico, Universidade Federal de Lavras. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/10064552-Aula-pratica-9-carneiro-hidraulico.html>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

DOCPLAYER, Medidor de vazão. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/12685040-Vazao-ou-fluxo-quantidade-de-fluido-liquido-gas-ou-vapor-que-passa-pela-secao-reta-de-um-duto-por-unidade-de-tempo.html>> Acesso em: 10 out. 2016.

EBAH, Distribuição de velocidades. Disponível em:
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAEE2AAE/distribuicao-velocidades>>
Acesso em: 15 nov. 2016.

FABRICANTE TecQuipments. *Manual de Mecânica dos Fluidos*: Equipamento H314 Hidrostática e Propriedades dos Fluidos. São Paulo: Nova Didacta, 2010. 52 p.

WIKIPEDIA, Efeito Venturi. Disponível em:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Venturi> Acesso em: 02 nov. 2016.

APÊNDICE A – Roteiro: Equilíbrio de Corpos Flutuantes

1. Equilíbrio de corpos flutuantes

1.1 Introdução

Corpos flutuantes são aqueles cujos pesos são inferiores aos pesos dos volumes do líquido que eles podem deslocar, ou seja, inferior ao empuxo. Em outras palavras, para que um corpo flutue, seu peso específico deve ser menor que o do líquido.

Chama-se carena à porção imersa do corpo flutuante. O centro de gravidade (CG) da parte submersa, que se denomina centro de carena (CC), é o ponto de aplicação do empuxo.

As forças que agem num corpo total ou parcialmente submerso em repouso são o seu peso (G), cujo ponto de aplicação é o centro de gravidade (CG) do corpo, e o empuxo (E), cujo ponto de aplicação é o centro de carena (CC).

Suponha-se um corpo em equilíbrio. Aplique-se uma força pequena nesse corpo. É evidente que, se ele estava em equilíbrio, a aplicação dessa força isolada fará com que se desloque em relação à posição inicial. Retirando-se essa força aplicada durante um intervalo de tempo muito pequeno, podem acontecer três coisas:

- O corpo retorna à posição de equilíbrio inicial: diz-se que o equilíbrio é estável.
- O corpo, mesmo retirando a força, afasta-se cada vez mais da posição inicial: diz-se que o equilíbrio é instável.
- O corpo permanece na nova posição, sem retornar, mas sem se afastar mais da posição inicial: diz-se que o equilíbrio é indiferente.

A seguir, analisa-se a estabilidade vertical e de rotação de corpos submersos, o caso horizontal não é analisado, pois o equilíbrio é indiferente.

1.1.1 Estabilidade Vertical

1.1.1.1 Caso o corpo esteja totalmente submerso em equilíbrio:

Neste caso, o volume deslocado será sempre o mesmo. Qualquer que seja o deslocamento sempre existirá o equilíbrio, já que o “E” e “P” não irá variar, trata-se de um equilíbrio indiferente.

1.1.1.2 Caso o corpo esteja parcialmente submerso:

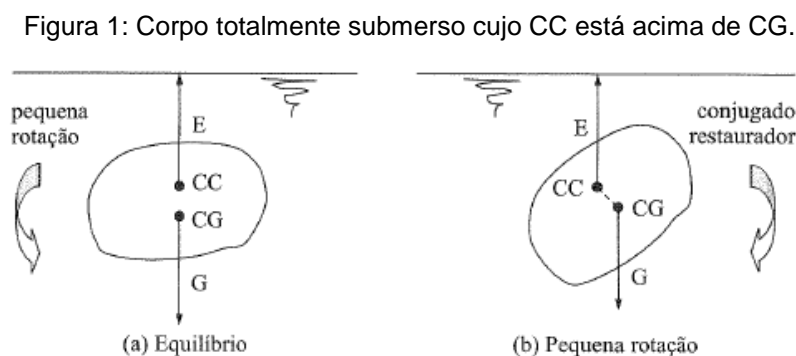
Ao deslocar o corpo para baixo, o volume de carena e o empuxo aumentam, ficando numa situação em que “E” > “G”. Ao retirar a força que causou o deslocamento, o corpo sobe até que haja uma diminuição do volume de carena para que novamente “E” = “G”, e isso ocorre na posição inicial. Assim, o equilíbrio é sempre estável.

1.1.2 Estabilidade à rotação

Suponha um corpo flutuante obrigado a abandonar a sua posição de equilíbrio, por uma pequena força que o faça girar um pequeno ângulo em torno de um eixo de rotação. Dois casos serão analisados.

1.1.2.1 Corpo totalmente submerso em equilíbrio:

A Figura 1 ilustra uma situação em que CC está acima de CG.

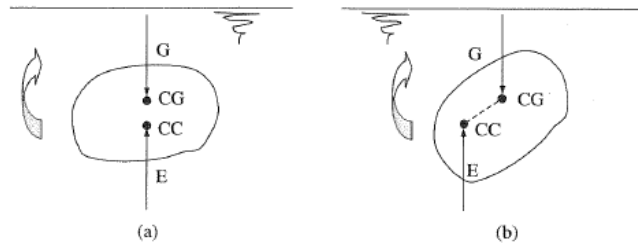


Fonte: BRUNETTI, 2008, p.39

Nesse caso, uma pequena rotação angular provoca um momento restaurador e o corpo está em um equilíbrio estável.

A Figura 2 ilustra uma situação em que CG está acima de CC.

Figura 2: Corpo totalmente submerso cujo CG está acima de CC.



Fonte: BRUNETTI, 2008, p.39

Nesse caso, uma pequena rotação angular provoca um momento que continuará aumentando a rotação, assim o corpo ficará em equilíbrio instável e tombará.

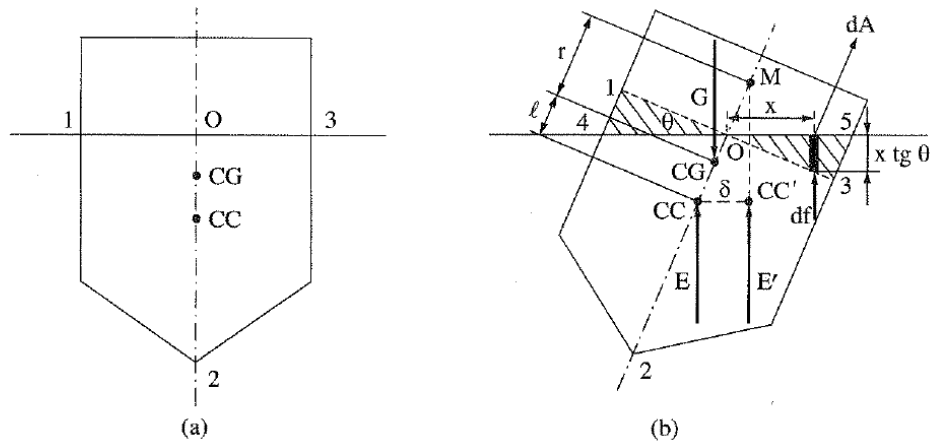
Quando o CG coincide com CC, tem-se que o equilíbrio é indiferente, uma situação que é encontrada sempre que a massa específica é constante em toda a extensão do corpo submerso.

1.1.2.2 Corpo parcialmente submerso em equilíbrio:

Se o centro de gravidade (CG) está abaixo do centro de carena (CC), o corpo é sempre estável, como no corpo submerso. O corpo pode estar em equilíbrio estável, porém, mesmo se CG estiver acima do CC. Quando um corpo gira, o CC move-se para uma nova posição. Se o CC se afasta o suficientemente, um momento de restauração é desenvolvido e o corpo pode ficar em equilíbrio estável, como será discutido a abaixo, para a Figura 3.

O corpo está em equilíbrio se seu CG e seu CC estiverem sobre a mesma linha vertical, como na Figura 3a. Esse equilíbrio pode ser abalado por uma série de motivos (ação do ventou ou onda), e o corpo em flutuação é feito para elevar-se ou declinar-se através de um ângulo (θ), conforme mostrado na Figura 3b.

Figura 3: Estabilidade de um corpo parcialmente submerso.



Fonte: BRUNETTI, 2008, p.40.

Quando o corpo flutuante é rotacionado, seu CG permanece inalterado, mas seu CC, que agora é o CG da área “425”, foi alterado de CC para CC'. O empuxo (E'), atuando de forma ascendente em CC' e o peso (G) do corpo, atuando descendente em CG, constituem um par que resiste a futuras transformações e tende a restaurar o corpo à sua posição de equilíbrio original.

Estendendo linha de ação de E' a partir de CC', tem-se que a reta vertical intercepta o eixo original de simetria em um ponto M. Este ponto é conhecido como metacentro do corpo flutuante, e a distância (r) entre o CG e o metacentro é a medida de estabilidade de flutuação do corpo. Se o ponto M estiver acima do CG, o equilíbrio é estável. Se estiver abaixo de CG, o equilíbrio é instável. Se M estiver em CG, o equilíbrio é indiferente.

Quanto mais acima estiver o metacentro em relação ao CG, mais estável o equilíbrio. Assim, é importante conhecer a distância do metacentro ao CG, altura metacêntrica (r). Tendo o corpo flutuante girado de um ângulo (θ) pequeno em torno do eixo de rotação O, nota-se que o volume de carena alterou-se de V_{123} para V_{425} , fazendo com que CC se desloque para CC'. No entanto, $E = E'$, já que o volume, apesar de mudar de forma, é o mesmo. Aplicando o equilíbrio dos momentos, chega-se que:

$$r = \frac{\gamma I}{G} - l = \frac{I}{V} - l$$

Equação 1

Sendo “ γ ” o peso específico do líquido, “ I ” o momento de inércia da área da seção de flutuação em relação ao eixo y , “ G ” o peso do corpo flutuante e “ V ” o volume submerso do corpo.

Assim, a estabilidade será aumentada diminuindo a distância entre o CC e o CG (l) e, portanto, abaixando o CG ou aumentando $\gamma I/G$, ou seja, aumentando o momento de inércia da seção de flutuação.

1.2 Experimento

1.2.1 Objetivos

Determinar a posição do centro de carena (CC), do centro de gravidade (CG) e do metacentro (M) de um corpo flutuante.

1.2.2 Materiais utilizados

- Equipamento para flutuabilidade mais seus acessórios;
- Tanque.

1.2.3 Procedimento

Com o peso ajustável colocado no centro de uma das fileiras, deixe a plataforma flutuante flutuar na água. Meça a altura submersa da plataforma para determinar a posição do centro de carena (CC). Coloque o peso ajustável nas posições 1,2 e 3 (veja as marcações no barco). Meça o ângulo que a linha do pêndulo, a partir do topo da vela, faz com o eixo de simetria da vela.

O equipamento utilizado está apresentado na Figura 4. A altura metacêntrica (r) pode ser obtida experimentalmente utilizando a Equação 2. Pela Equação 2, calcula-se a distância ($r + l$) entre (CC) e o metacentro (M). Assim, por diferença, determina-se a distância (l), que é a distância entre o CC e o centro de gravidade (CG).

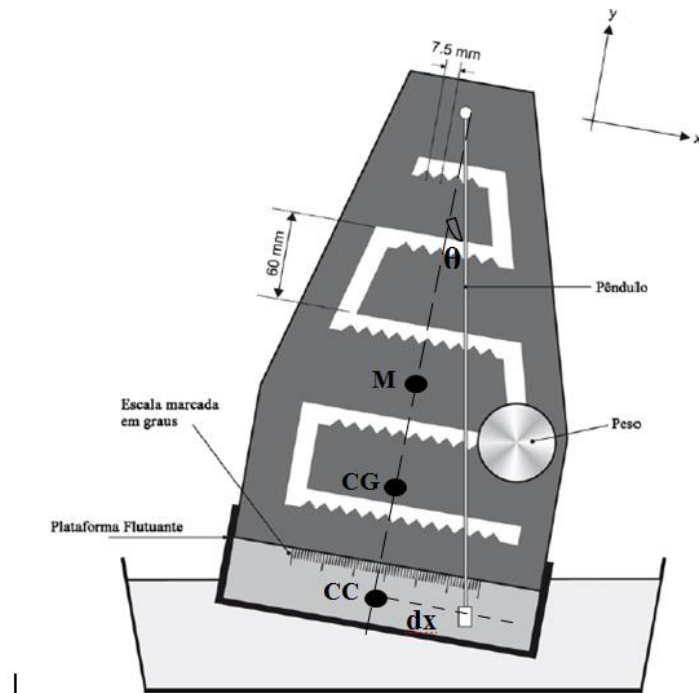
$$r = \frac{m dx}{W \theta}$$

Equação 2

Informações sobre a plataforma flutuante:

- Massa total (W) = 2,607 kg;
- Massa do peso ajustável (m) = 0,387 kg;
- Largura do barco = 0,20 m;
- Comprimento do barco = 0,36.

Figura 5 – Estrutura da plataforma flutuante.



Fonte: TECQUIPMENT, 2010, p.29 (adaptado pelo autor).

Tabela 1: Dados coletados sob a plataforma flutuante

Altura submersa inicial (cm)	Ângulo (°)	dx (cm)

1.2.4 Resultados

Adotar a aceleração da gravidade igual a $10,0 \text{ m}^2/\text{s}$ e peso específico igual a $1000 \text{ kgf}/\text{m}^3$.

Tabela 2: resultados obtidos com a plataforma flutuante

Profundidade de CC (cm)	r (cm)	I (m^4)	r + I (cm)	I (cm)

APÊNDICE B – Roteiro: Medidores de Vazão

1. Medidores de vazão

1.1. Introdução

Medidor de vazão é todo dispositivo que permite, de forma direta ou indireta, determinar o volume de fluido que passa através de uma seção de escoamento por unidade de tempo. A primeira observação histórica foi dada por Leonardo da Vinci, em 1502, que percebeu que a quantidade de água que escoava em um rio era a mesma em qualquer parte, independente da largura, profundidade, inclinação e outros. Porém os primeiros dispositivos práticos surgiram principalmente com os trabalhos dos pesquisadores Bernoulli e Pitot, com o nascer da era industrial, a partir de onde se desenvolveram rapidamente.

A escolha de um instrumento para medição de vazão apropriado depende de vários fatores. Dentre eles, pode-se destacar a exatidão desejada na medição, o tipo de fluido a ser medido (líquido ou gás, sujo ou limpo, número de fases, etc.), condições termodinâmicas, como níveis e faixa de pressão e temperatura nos quais o medidor deve atuar, espaço físico disponível, custo.

Os tipos de medidores podem ser classificados, resumidamente, em medidores indiretos, utilizando fenômenos intimamente relacionados a quantidade de fluido passante, como manômetro U, Tubo de Venturi, Tubo de Dali, Placa de orifício e Rotâmetro; medidores diretos de volume do fluido passante, como Disco Nutante, Pistão Flutuante, Rodas Ovais, Tipo Hélice e Tipo Turbina; e medidores especiais, como por Eletromagnetismo, Vortex, ultra-sônico e Coriolis.

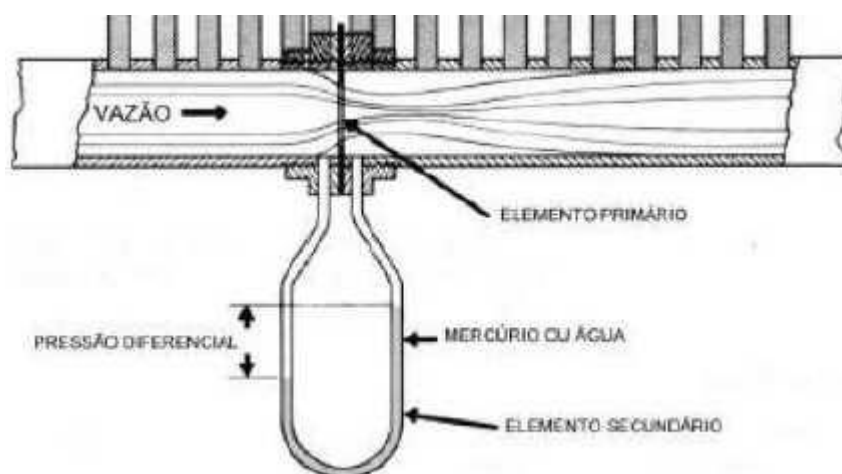
1.2. Medição de vazão por pressão diferencial

Considerando-se uma tubulação com um fluido passante, chama-se perda de carga dessa tubulação a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessá-la. As causas da perda de carga são: atrito entre o fluido e a parede

interna do tubo, mudança de pressão e velocidade devido a uma curva ou um obstáculo, entre outros.

Os diversos medidores de perda de carga variável usam diferentes tipos de obstáculos ao fluxo, que tem como função aumentar a velocidade do fluido diminuindo a área da seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão (Figura 1). Relacionando essa perda de pressão com a vazão, determina-se a vazão desejada.

Figura 1: Queda de pressão devido à uma obstrução (tubo de Venturi)



Fonte: <http://docplayer.com.br/12685040-Vazao-ou-fluxo-quantidade-de-fluido-liquido-gas-ou-vapor-que-passa-pela-secao-reta-de-um-duto-por-unidade-de-tempo.html> (2016)

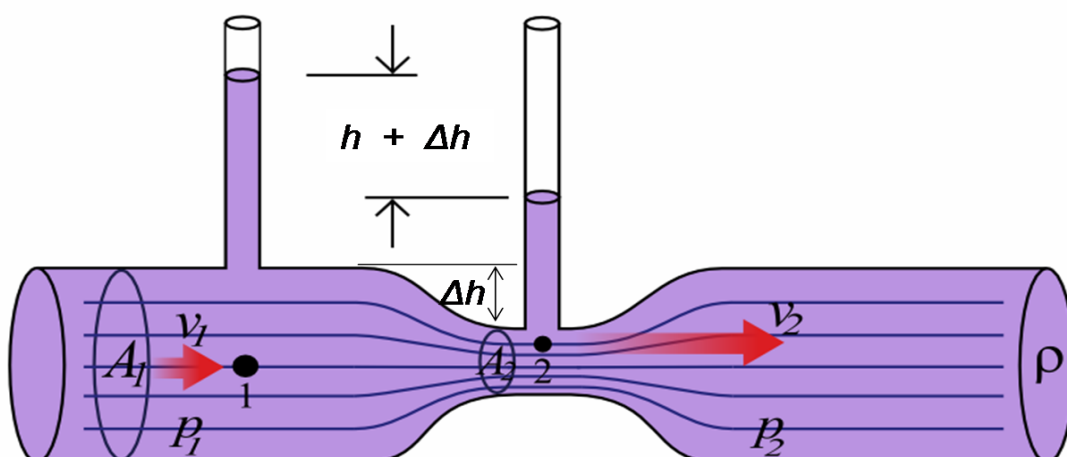
1.3. Medidor Venturi

O tubo de Venturi é um aparato criado por Giovanni Battista Venturi para medir a velocidade do escoamento e a vazão de um líquido incompressível através da variação da pressão durante a passagem do fluido por um tubo de seção mais larga e depois por outro de seção mais estreita. Seu propósito é acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática. Assim, com o auxílio de um medidor de pressão pode-se ter uma relação da altura da coluna de água deslocada com a vazão. Este tipo de medidor apresenta o melhor desempenho entre os medidores de obstrução, tendo a menor perda de carga durante a medição. A perda de carga é menor, pois não ocorre a separação de uma camada de fluido turbulenta, como ocorre, por exemplo, na placa de orifício.

O medidor Venturi é constituído de uma seção a montante do mesmo diâmetro do conduto, que através de uma seção cônica convergente (ângulo geralmente de 20 a 30°) o leva a uma seção mínima, garganta do Venturi, e através de uma seção cônica divergente, retorna gradualmente ao diâmetro do conduto. O difusor cônico divergente gradual à jusante da garganta fornece excelente recuperação da pressão. Isto garante uma pequena perda de carga neste tipo de aparelho. A especificação de um medidor Venturi é feita pelos diâmetros do conduto e da garganta, sendo que este último deve ser projetado para propiciar uma pressão (pressão mínima) maior que a pressão de vapor do fluido que escoar, evitando desta forma que o mesmo vaporize na temperatura do escoamento, o que caracterizaria o fenômeno denominado de cavitação.

Visto que a contração de área originará um aumento da carga cinética e, conseqüentemente, diminuição da carga de pressão, pode-se comprovar tal afirmação com a aplicação da Equação de Bernoulli (Equação 1 e Equação 2), da Equação da Continuidade e da Equação Manométrica. Para tal, é preciso considerar o fluido como ideal e aplicar a Equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, em que o ponto 1 está à montante do estrangulamento e o ponto 2 está no estrangulamento, na seção do diâmetro menor (veja Figura 2).

Figura 2: O Tubo de Venturi



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Venturi (2016).

$$H_1 = H_2 \quad \text{Equação 1}$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\lambda} + \frac{v_1}{2g} = Z_1 + \frac{P_2}{\lambda} + \frac{v_2}{2g} \quad \text{Equação 2}$$

Como o medidor é instalado no plano horizontal, a carga potencial (Z) é constante, chegando-se a Equação 3.

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g - \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad \text{Equação 3}$$

Pela Equação da Continuidade aplicada a um escoamento incompressível e permanente, considerando A_2 igual à área da garganta, tem-se a Equação 4.

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad \text{Equação 4}$$

Substituindo a Equação 16 na Equação 14, tem-se a Equação 5.

$$v_2^2 - v_1^2 \left(\frac{D_2^2}{D_1^2} \right) = 2g - \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad \text{Equação 5}$$

Através de um manômetro em U instalado entre as seções 1 e 2 da Figura 2 tem-se a Equação 6.

$$P_1 - P_2 = h \times (\gamma_m - \gamma) \quad \text{Equação 6}$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 5, forma-se a Equação 7.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \quad \text{Equação 7}$$

Dado que a vazão é igual à velocidade multiplicada pela área e que a velocidade v_2 é a velocidade teórica, a vazão que passa pelo estrangulamento é determinada pela equação 8.

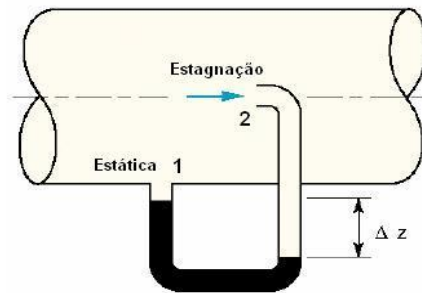
$$Q_{real} = C_v A_2 \times \sqrt{\frac{2gh \times \left(\frac{\gamma_m - \gamma}{\gamma}\right)}{1 \times \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \quad \text{Equação 8}$$

em que C_v é o coeficiente de velocidade, usado para corrigir a velocidade teórica e transformá-la na velocidade real.

1.4. Tubo de Pitot

O tubo de Pitot é um instrumento de medição que mede a velocidade de fluidos em modelos físicos em laboratórios de hidráulica, em laboratórios de aerodinâmica e também na hidrologia para a medição indireta de vazões em canais e rios, em redes de abastecimento de água, em adutoras, em oleodutos e ainda a velocidade dos aviões, medindo a velocidade de escoamento do ar. É um tubo aberto dirigido contra a corrente do fluido que indica a pressão total, conforme visto na Figura 8. A pressão total corresponde à soma das pressões estática (aquela que é obtida perpendicularmente ao escoamento) e dinâmica (determinada pela transformação da energia cinética em carga de pressão).

Figura 3: Tubo de Pitot em uma tubulação



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAE2AAE/distribuicao-velocidades> (2016).

Com base no valor da velocidade de escoamento em uma tubulação, é possível determinar a vazão que passa pelo conduto. Para isso é necessário relacionar as equações manométrica e de Bernoulli. Aplicando-se a Equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 (veja Figura 3), tem-se a Equação 9 e, isolando v_1 , chega-se a Equação 10.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} \quad \text{Equação 9}$$

$$v_1 = \sqrt{2g \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right)} \quad \text{Equação 10}$$

Aplicando-se a equação do manômetro diferencial tem-se a Equação 11.

$$P_1 + \gamma_1 h' + \gamma_2 h = P_2 + \gamma_1 (h + h') \quad \text{Equação 11}$$

Relacionando a Equação 10 e a Equação 11 chega-se na Equação 12.

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad \text{Equação 12}$$

Determinado o valor da velocidade através da equação acima e tendo conhecimento da área da tubulação, determina-se então o valor da vazão.

1.5. Experimento

1.5.1 Objetivo

Comparar a vazão por diferentes métodos de medição.

1.5.2 Materiais Utilizados

- Mangueira;
- Tubo de Venturi;
- Tubo de Pitot;
- Béquer.

1.5.3 Procedimento

Ligue a torneira, controle a vazão e aguarde até que o nível d'água se estabilize nos piezômetros. Leia a altura piezométrica no tubo de Venturi e no tubo de Pitot. Pelo método gravimétrico, anote os valores dos volumes e do tempo três vezes.

No tubo de Venturi têm-se:

Tabela 1: Dados coletados no tubo de Venturi

Altura D_1 (cm)	Altura D_2 (cm)

No tubo de Pitot têm-se:

Tabela 2: Dados coletados nos tubos de Pitot

Alturas (cm)

Pelo método gravimétrico, tem-se:

Tabela 3: Dados coletados pelo método gravimétrico

Volume (mL)	Tempo (s)

1.5.4 Resultados

Para o tubo de Venturi, considere $D_1 = 20$ mm e $D_2 = 15$ mm.

Tabela 4: Resultados do tubo de Venturi

$\frac{P_1 - P_2}{\gamma}$ (N/m ²)	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	Q (m ³ /s)

Para o tubo de Pitot, considere $D = 20$ mm, $L = 69,3$ cm e $C = 145$.

Tabela 5: Resultados do tubo de Pitot

$\frac{P_1}{\gamma}$ (N/m ²)	$\frac{P_2}{\gamma}$ (N/m ²)	h_T (m)	Q (m ³ /s)

Para o método gravimétrico:

Tabela 6: Resultados obtidos pelo método gravimétrico

Q (m ³ /s)	Q _{med} (m ³ /s)

APÊNDICE C – Roteiro: Carneiro Hidráulico

1. Carneiro Hidráulico

1.1 Introdução

O carneiro hidráulico, também chamado de bomba de aríete, foi inventado em 1796 pelo cientista Jacques E. Montgolfier. O carneiro é um dos dispositivos mais práticos e baratos para bombear água, sendo de simples manejo e de pouca manutenção. Para funcionar, o carneiro não necessita de energia elétrica ou de combustível fóssil, é uma máquina de funcionamento automático e capaz de aproveitar o “golpe de aríete” para bombear água.

Uma vez instalado, o aparelho é colocado em nível inferior ao manancial e opera 24 h/dia. A água que chega ao carneiro inicialmente sai por uma válvula de descarga, até o momento em que atinge certa velocidade. Neste momento, a válvula de descarga fecha-se repentinamente (Golpe de Aríete), ocasionando uma sobrepressão que possibilita, automaticamente, a elevação de uma parcela de água que nele penetra a uma altura superior aquela de onde a água proveio, sem necessitar do auxílio de qualquer força motriz externa; ou seja, basta que se tenha uma pequena queda hidráulica.

1.2 Equação Geral do Carneiro Hidráulico

A vazão fornecida pelo carneiro hidráulico depende da vazão de acionamento e também da diferença de cota entre o ponto de captação e o local onde o carneiro está instalado.

A vazão recalçada q é calculada pela Equação 2:

$$QhR = qH \quad \text{Equação 1}$$

$$q = \frac{RQh}{H} \quad \text{Equação 2}$$

em que q é a vazão recalçada em L/min, R é o rendimento do carneiro hidráulico (Tabela 1), Q é a vazão de alimentação em L/min, h é a altura de queda em metros e H é a altura total de recalque (Desnível + Perda de Carga) em metros.

1.3 Rendimento do Carneiro

O Rendimento do Carneiro Hidráulico é em função da relação entre a altura de queda h e a altura total de recalque H .

Tabela 1 – Relação entre Rendimento e h/H

Relação h/H	Rendimento (%)
1:2	80
1:3	75
1:4	70
1:5	65
1:6	60
1:7	55
1:8	50

Fonte: <http://docplayer.com.br/10064552-Aula-pratica-9-carneiro-hidraulico.html> (2016).

O carneiro possui duas alturas de recalque diferentes (H_1 e H_2). A altura pode ser variada com o fechamento ou abertura dos registros 1 e 2, sendo possível variar a relação h/H e encontrar diferentes vazões de saída, conforme Figura 1.

O procedimento deverá ser feito comparando-se a vazão calculada e a vazão medida pelo método direto em duas situações, uma com as alturas h e H_1 e a outra com as alturas h e H_2 .

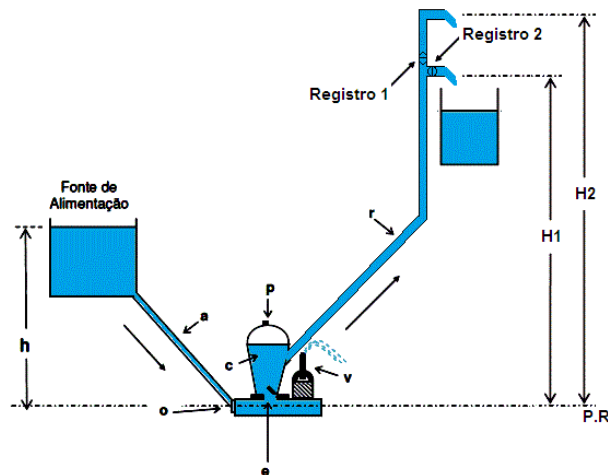
Na figura, tem-se que h é a altura de queda, H a altura total do recalque, c a campânula, v é a válvula de escape, a é a tubulação de adução, r é a

tubulação de recalque, e a válvula de admissão, p o parafuso (reposição de ar) e o e é o orifício de entrada de ar.

Configuração 1 – Registro 1 aberto e registro 2 fechado;

Configuração 2 – Registro 2 aberto e registro 1 fechado.

Figura 1: Disposição do equipamento apresentando H1 e H2



Fonte: <http://docplayer.com.br/10064552-Aula-pratica-9-carneiro-hidraulico.html> (Adaptado 2016).

1.4 Experimento

1.4.1 Objetivo

Comparar a vazão recalçada de acordo com a altura de recalque.

1.4.2 Procedimento

Após ligado o carneiro, feche o registro 2 enquanto o 1 está aberto, colete água na saída da tubulação de recalque cronometrando o tempo e meça as alturas de recalque e de queda. Repita o experimento fechando o registro 1 e abrindo o registro 2. Os dados devem ser anotados na Tabela 3.

Para cada situação, calcule as vazões pelo método direto e através da Equação 2. Para determinar a vazão de alimentação, colete água na válvula de escape e some com o volume coletado na saída da tubulação de recalque. É importante que a coleta de água nesses dois pontos seja feita

simultaneamente. Faça o mesmo procedimento duas vezes para cada configuração.

Tabela 2: Dados recolhidos durante o experimento

Configuração	Tempo (min)	Volume (L)	Vazão q (L/min)	Vazão média q (L/min)
1				
2				

1.4.3 Resultados:

Tabela 3: Valores calculados para as duas configurações

Configuração	Volume recalcado + escape (L)	Vazão Q (L/min)	Vazão média Q (L/min)
1			
2			

Tabela 6: Valores calculados

H (m)	h (m)	R (%)	Q média (L/min)	q calculada (L/min)

Uma possível diferença entre a vazão calculada e a vazão medida pode ser solucionada rosqueando ou afrouxando o parafuso que fica na válvula de escape.