

Produtos e Materiais Didáticos

Um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes (An experimental apparatus to study the Archimedes' Principle)

Valmar Carneiro Barbosa¹ e Ana Maria Senra Breitschaft

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro RJ, Brasil

Recebido em 30/3/2005; Revisado em 8/9/2005; Aceito em 16/11/2005

Neste trabalho apresentamos um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes, assim como a experiência realizada com ele e uma sugestão de roteiro para esta experiência que pode ser usado em aulas de física experimental.

Palavras-chave: empuxo, princípio de Arquimedes, experiência.

We present an experimental apparatus to study the Archimedes' principle and the experiment carried out with this equipment. A laboratory guide to this experiment is also presented, which may be used in teaching experimental physics.

Keywords: buoyancy, Archimedes' principle, experiment.

1. Introdução

Quando estivemos envolvidos com a reformulação da disciplina Física Experimental 2, oferecida pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IF-UFRJ) a todos os alunos dos cursos de ciências matemáticas e naturais e de tecnologia no segundo semestre de suas formações nesta Universidade, deparamos com o fato de que não havia sequer uma experiência relacionada à mecânica dos fluidos. Decidimos, portanto, introduzir durante esta reformulação uma experiência que tivesse como objetivo um estudo do princípio de Arquimedes, que descreve a força exercida por um fluido sobre um corpo imerso parcialmente ou totalmente nele. Este princípio diz que a intensidade desta força, conhecida como força empuxo, é igual ao peso da porção de fluido deslocada pelo corpo. Esta força é a responsável pela flutuação de um pedaço de gelo em um recipiente contendo água, de um iceberg num oceano, de embarcações e bóias; pela ascensão de balões e dirigíveis no ar, de bolhas de gás carbônico em bebidas gasosas; pelo princípio de funcionamento do densímetro; etc.

Arquimedes nasceu por volta de 287 a.C. na cidade-estado grega independente de Siracusa (Sicília, atualmente pertencente à Itália) e foi morto por um soldado romano, que não sabia quem ele era, em 212 (ou 211) a.C. durante o saqueamento após a conquista desta cidade por Roma na Segunda Guerra Púnica (uma das três guerras entre Cartago, atualmente per-

tencente à Tunísia, e Roma). Logo antes de ser assassinado, Arquimedes estaria concentrado em diagramas que teria desenhado na poeira do chão quando, percebendo a aproximação do soldado romano, haveria dito: *Não estrague minhas circunferências*. Provavelmente estudou em Alexandria (Egito) sob a influência dos discípulos de Euclides e, ao longo de sua vida, deu contribuições a diversas áreas do conhecimento da humanidade (matemática, física, engenharia, astronomia e filosofia). Arquimedes ficou famoso em sua época pela invenção de várias máquinas usadas na defesa de Siracusa contra a invasão dos romanos, durante as duas primeiras Guerras Púnicas. É considerado por alguns historiadores da matemática como um dos maiores matemáticos da história, juntamente com Newton, Euler e Gauss. Na física, são atribuídas a ele, entre outras, as seguintes contribuições: a Lei da Alavanca, em relação à qual teria comentado *Dê-me onde apoiar e movo a Terra.*; o início da picnometria (do grego *pyknós*, que significa denso, compacto, espesso), que é uma metodologia destinada à medição do volume ou da massa específica de sólidos ou líquidos; e a Lei do Empuxo ou princípio de Arquimedes.

No primeiro século a.C., portanto muito depois da morte de Arquimedes, um arquiteto romano de nome Vitruvius relatou uma estória de como Arquimedes descobriu uma fraude na manufatura de uma coroa de ouro encomendada por Hiero II, rei de Siracusa. Provavelmente, esta coroa tinha a forma de uma grinalda e, segundo a estória, deveria ornamentar a es-

¹E-mail: valmar@if.ufrj.br.

tátua de um deus ou uma deusa em algum templo, como pagamento de uma promessa feita por Hiero II com o intuito de alcançar o poder. Como Hiero II suspeitava que o ourives o havia enganado, trocando parte do ouro dado a ele por uma quantidade de prata de mesma massa, pediu a Arquimedes que determinasse se a coroa era de ouro puro ou não, com a ressalva de que ele não poderia causar nenhum dano à coroa, uma vez que se tratava de um objeto sagrado. Em termos atuais, Arquimedes deveria realizar um teste não destrutivo. Segundo a estória, ele encontrou a solução para este problema em uma casa de banho, quando observou que quanto mais seu corpo entrava na água contida numa tina mais água vazava para fora dela. Percebendo que isto era o caminho para solucionar o caso em questão, conta a estória que ele pulou para fora da tina e, nu, correu de volta para casa gritando repetidamente para si mesmo, em grego, *Eureka, eureka*. (que significa *Encontrei, encontrei*). Com esta observação, Arquimedes teria descoberto como determinar o volume de qualquer objeto, mergulhando-o totalmente na água contida em um recipiente e medindo o volume de água deslocado por ele. Assim, como relata Vitruvius, Arquimedes fez uma peça de prata e outra de ouro de massas iguais à da coroa e, determinando os volumes destes três objetos como descrito e comparando-os entre si, teria comprovado a fraude do ourives. Além deste método, obviamente, não fazer uso do princípio de Arquimedes, há dúvidas se à sua época ele teria tido acurácia suficiente para determinar a diferença entre o volume da coroa e o volume da peça de ouro usando o método descrito. Uma discussão detalhada sobre isto e a descrição de um outro método baseado no uso simultâneo da Lei da Alavanca e do princípio de Arquimedes, que poderia ter sido usado por Arquimedes para comprovar a fraude do ourives, podem ser encontradas na referência [1], de onde, aliás, foram tiradas as informações históricas sobre Arquimedes apresentadas aqui.

Uma vez tomada a decisão de realizar uma experiência com o objetivo de estudar o princípio de Arquimedes, nosso passo seguinte foi procurar, entre as empresas que produzem equipamentos para laboratórios de ensino, um aparato que se adequasse aos nossos propósitos. Concluímos, após algum tempo, que os equipamentos disponíveis para aquisição apresentavam características não desejáveis por quem quer realizar um estudo experimental quantitativo e, além disso, executado por algumas centenas de alunos ao longo de uma semana do decorrer da disciplina em questão. Alguns destes equipamentos tinham como objetivo apenas a demonstração do fenômeno em questão enquanto que outros, apesar de se proporem a fazer medidas, produziam, do nosso ponto de vista, dados experimentais quantitativos de qualidade duvidosa. Em ambos os casos, concluímos, também, que tais equipamentos não eram robustos o suficiente para agüentarem a carga de trabalho a que seriam submetidos ao longo dos anos.

Assim sendo, resolvemos projetar e construir no próprio Instituto de Física da UFRJ um aparato experimental para o estudo do princípio de Arquimedes que satisfizesse os quesitos mencionados acima: quantitatividade, qualidade dos dados experimentais produzidos e robustez. Já faz 5 anos que os dois laboratórios de Física Experimental 2 do IF-UFRJ contam com 12 aparatos destes em funcionamento, que são usados por, aproximadamente, 500 alunos por semestre.

O presente trabalho tem como objetivo documentar as diferentes etapas do desenvolvimento do experimento em questão, desde o seu projeto até a tomada e análise dos dados experimentais coletados, passando pelo guia usado pelos alunos, onde se encontram todas as tarefas necessárias ao entendimento e aproveitamento da experiência realizada. Assim, na Seção 2 apresentaremos a idéia da experiência em questão, os dados experimentais coletados com o aparato construído por nós e a análise destes dados. Na Seção 3 apresentaremos o guia para esta experiência usado pelos alunos. Na Seção 4 apresentaremos o equipamento construído com os detalhes que, acreditamos, são suficientes para a sua reprodução. Finalmente, na última seção faremos alguns comentários finais.

2. A experiência

Nesta seção apresentaremos o experimento que visa o estudo do princípio de Arquimedes. Esta experiência foi realizada utilizando-se o arranjo experimental que aparece na fotografia mostrada na Fig. 1, onde podemos ver uma proveta graduada, contendo uma quantidade de um certo líquido, apoiada em uma balança que, por sua vez, encontra-se sobre a base de um elevador capaz de mergulhar gradativamente um corpo metálico neste líquido.

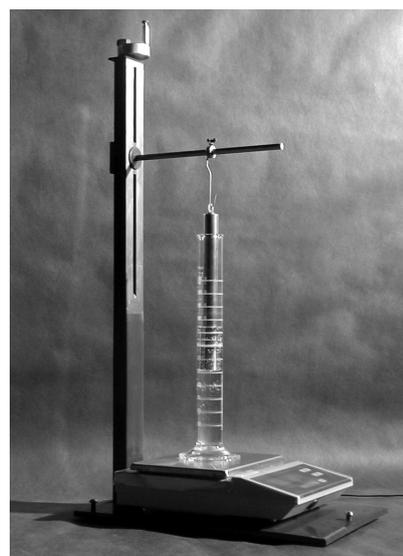


Figura 1 - Fotografia do aparato experimental.

Para compreender o procedimento experimental que se seguirá, vamos considerar a parte superior da Fig. 2 onde está mostrado, diagramaticamente, o que acontece antes e após a introdução de um objeto num líquido contido numa proveta sobre uma balança. Antes da introdução do objeto no líquido, o valor do volume de líquido registrado pela proveta graduada é V_0 enquanto que a massa M_0 medida pela balança é a massa da proveta e do líquido em seu interior. Com a introdução, parcial ou total, do objeto suspenso pelo elevador neste líquido, o valor do volume registrado pela proveta e o valor da massa medida pela balança aumentarão para V e M , respectivamente, mesmo não tendo havido aumento da quantidade de líquido no interior da proveta.

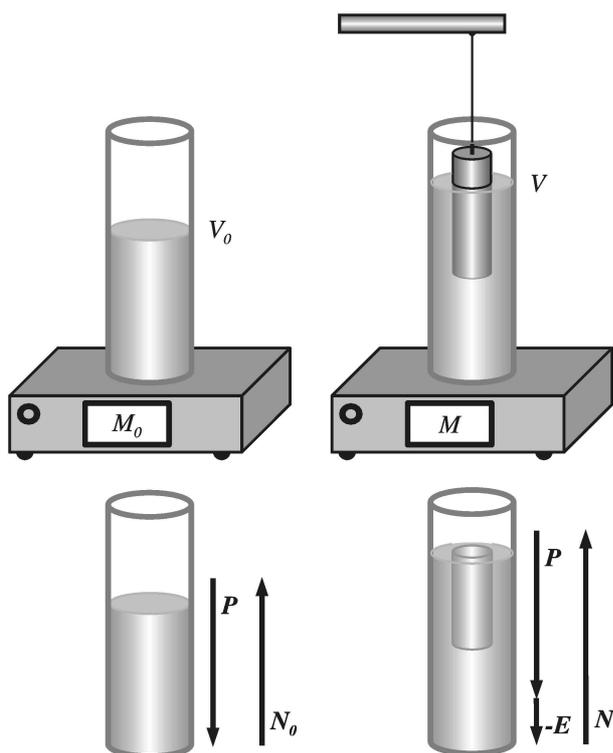


Figura 2 - Diagramas das forças que atuam no recipiente com líquido, antes e depois de mergulhar um objeto neste líquido.

Além das forças que obviamente estão atuando no objeto (seu peso e a força de sustentação devida ao elevador), uma outra força, chamada de empuxo, atua também nele graças ao fato dele estar parcialmente ou totalmente mergulhado em um líquido. Segundo o princípio de Arquimedes [2, 3], esta força empuxo (\mathbf{E}) tem a mesma direção e módulo que a força peso associada à quantidade de líquido deslocada pelo objeto, porém de sentido oposto ao dela. Portanto, se a densidade volumétrica de massa do líquido em questão é ρ_ℓ , a intensidade da força empuxo é dada por:

$$\frac{E}{g} = \rho_\ell(V - V_0), \quad (1)$$

onde g é o módulo da aceleração da gravidade e $V - V_0$ é igual ao volume do líquido que foi deslocado ao se mer-

gulhar o objeto nele. A equação acima nos diz que a quantidade E/g é diretamente proporcional ao volume de líquido que foi deslocado e a constante de proporcionalidade é a densidade deste líquido. Ao contrário do que muitas vezes possa parecer, a força empuxo não depende nem do tipo de material de que é feito o objeto nem de sua forma.

Para determinarmos experimentalmente de que o empuxo depende e como é esta dependência, temos que saber medir o seu valor. Na parte inferior da Fig. 2 mostramos cada uma das situações vistas em sua parte superior acompanhada das forças que atuam no sistema proveta com líquido. Considerando que \mathbf{P} é a força peso do sistema proveta com líquido, que \mathbf{N}_0 e \mathbf{N} são, respectivamente, as forças normais que a balança exerce neste sistema antes e após a introdução do objeto no líquido e que, pela 3ª Lei de Newton, $-\mathbf{E}$ é a força que o objeto exerce sobre este sistema devido ao empuxo aplicado a ele, as condições de equilíbrio estático do sistema proveta com líquido nas duas situações ilustradas na figura em questão são:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} + \mathbf{N}_0 &= 0 \\ \mathbf{P} + (-\mathbf{E}) + \mathbf{N} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

de onde podemos obter que

$$\mathbf{E} = \mathbf{N} - \mathbf{N}_0, \quad (3)$$

de modo que

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{N}| - |\mathbf{N}_0|, \quad (4)$$

uma vez que as forças \mathbf{N}_0 e \mathbf{N} têm mesma direção e sentido e $|\mathbf{N}_0| < |\mathbf{N}|$. Como $-\mathbf{N}_0$ e $-\mathbf{N}$ são, novamente pela 3ª Lei de Newton, as forças que o sistema proveta com líquido exerce sobre a balança nas duas situações descritas e são registradas por ela, respectivamente, através dos valores de massa M_0 e M , temos que $|\mathbf{N}_0| \equiv |-\mathbf{N}_0| = M_0g$ e $|\mathbf{N}| \equiv |-\mathbf{N}| = Mg$, e, portanto, a equação acima nos fornece uma maneira indireta de se determinar a intensidade da força empuxo a partir das massas M_0 e M registradas na balança nas duas situações esquematizadas na Fig. 2, ou seja

$$\frac{E}{g} = M - M_0, \quad (5)$$

onde chamamos $|\mathbf{E}|$ apenas de E para simplificar a notação.

Com o método descrito no parágrafo anterior, podemos determinar as intensidades da força empuxo para diferentes situações do sistema em questão. Na Tabela 1 apresentamos os valores das medidas diretas realizadas com a montagem experimental vista na Fig. 1. Utilizamos dois líquidos de densidades volumétricas de massa bastante diferentes entre si (água e glicerina) e objetos para serem mergulhados nestes líquidos que, além de serem constituídos por materiais de densidades muito diferentes (alumínio e latão, veja as densidades na Seção 3.3.), tinham forma de cilindro ou de paralelepípedo. Note, também, que o volume

V medido com a proveta graduada, a cada submersão diferente dos objetos, foi usado como variável controlada ao longo da experiência, uma vez que a escala da proveta utilizada traria problemas de interpolação devidos à sua relativa baixa sensibilidade (vide Tabela 2) caso tivéssemos optado por controlar a massa M .

Tabela 1 - Os resultados experimentais.

Resultados experimentais obtidos com água		
$V_0 = (150 \pm 1) \text{ mL}$		
$M_0 = (394,8 \pm 0,1) \text{ g}$		
Corpos imersos	$(V \pm 1) \text{ mL}$	$(M \pm 0,1) \text{ g}$
Cilindro de alumínio	180	423,1
	210	452,7
	240	482,5
	250	493,7
Paralelepípedo de alumínio	160	404,4
	190	433,5
	220	463,5
Cilindro de latão	170	414,1
	200	443,7
	230	473,5

Resultados experimentais obtidos com glicerina		
$V_0 = (150 \pm 1) \text{ mL}$		
$M_0 = (432,4 \pm 0,1) \text{ g}$		
Corpo imerso	$(V \pm 1) \text{ mL}$	$(M \pm 0,1) \text{ g}$
Cilindro de alumínio	160	445,7
	170	457,9
	180	470,3
	190	482,7
	200	495,3
	210	507,7
	220	519,8
	230	532,7
	240	544,2
	250	556,9

Os resultados experimentais reunidos na Tabela 1 encontram-se representados graficamente na Fig. 3, onde o eixo horizontal está diretamente relacionado à intensidade da força empuxo (E/g) e o vertical representa o volume de líquido deslocado ($V - V_0$) pelos objetos imersos nele. As incertezas nas quantidades E/g ($\sigma_{E/g}$) e $V - V_0$ (σ_{V-V_0}) foram obtidas a partir da relação geral para a propagação de incertezas [4] que, lembrando-se que E/g é obtido usando-se a Eq. 5, resulta em:

$$\begin{aligned} \sigma_{E/g} &\approx \sqrt{2}\sigma_M \\ \sigma_{V-V_0} &\approx \sqrt{2}\sigma_V, \end{aligned} \quad (6)$$

onde σ_M e σ_V são, respectivamente, as incertezas nas medidas diretas de massas e de volumes para as quais assumimos os valores de 0,1 g e 1 mL. Graças a estes valores, as incertezas nas abscissas dos pontos experimentais são bem menores do que o tamanho dos símbolos usados para representá-los graficamente e, também, a incerteza relativa na determinação de E/g é pelo menos 10 vezes menor do que a associada à determinação de $V - V_0$, o que torna irrelevante a consideração da incerteza em E/g no resto da análise dos dados experimentais em questão.

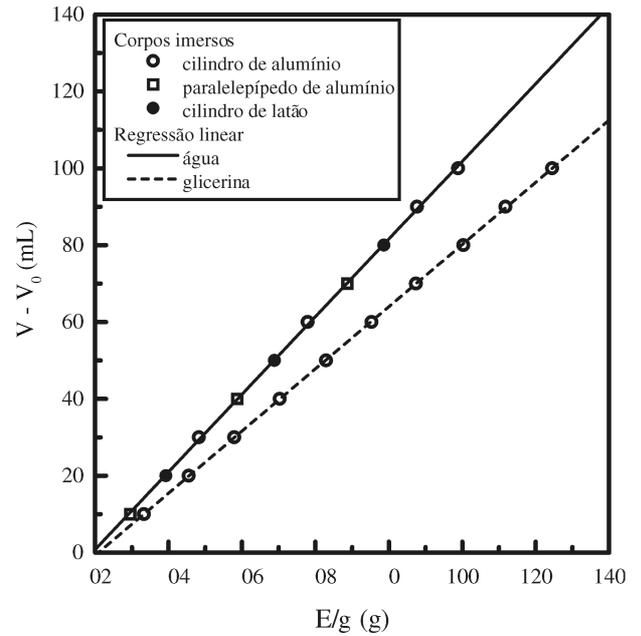


Figura 3 - Representação gráfica dos resultados experimentais.

Analisando-se o comportamento dos pontos experimentais que aparecem no gráfico da Fig. 3, observa-se que a intensidade da força empuxo não depende nem do material de que são feitos os objetos mergulhados nos líquidos nem de suas formas. Por outro lado, vemos que o valor do empuxo depende do volume de líquido que foi deslocado pela parte do objeto que foi submersa e do tipo de líquido usado. Como também pode ser notado no gráfico em questão, a dependência do valor do empuxo com o volume de líquido deslocado é uma proporção direta cujo coeficiente de proporcionalidade depende do líquido usado.

Com o objetivo de parametrizarmos a dependência entre $V - V_0$ e E/g adotamos uma versão simplificada do método de regressão linear [4] aplicável aos casos em que as abscissas (no caso E/g) são desprovidas de incertezas ou, como é o caso em questão, possuem incertezas desprezíveis. Os coeficientes angular (a) e linear (b) obtidos para cada um dos líquidos usados, assim como as incertezas em suas determinações, foram:

$$\begin{aligned} a_{ag} &= (1,010 \pm 0,016) \text{ mL/g} \\ b_{ag} &= (0,80 \pm 0,95) \text{ mL} \\ a_{gl} &= (0,809 \pm 0,012) \text{ mL/g} \\ b_{gl} &= (-0,73 \pm 0,97) \text{ mL}, \end{aligned} \quad (7)$$

onde os subíndices ag e gl referem-se à água e à glicerina, respectivamente. Note que, em ambos os casos, o coeficiente linear obtido é compatível com uma relação de proporcionalidade direta entre $V - V_0$ e E/g . Cada uma das retas geradas com o conjunto de coeficientes correspondentes é mostrada, também, no gráfico da Fig. 3.

Comparando-se o tipo de parametrização feita acima para a dependência entre $V - V_0$ e E/g com

o princípio de Arquimedes expresso na Eq. 1, somos levados a interpretar o inverso do valor do coeficiente angular como sendo a densidade volumétrica de massa do líquido usado (ρ_ℓ). Assim, para cada um dos líquidos usados podemos obter a sua densidade a partir de:

$$\rho_\ell = \frac{1}{a}, \quad (8)$$

e, deste modo, usando a relação geral para a propagação de incertezas [4], a incerteza na determinação de ρ_ℓ (σ_{ρ_ℓ}) é dada por:

$$\sigma_{\rho_\ell} \approx \frac{\sigma_a}{a} \rho_\ell, \quad (9)$$

onde σ_a representa a incerteza no coeficiente angular. Assim sendo, usando os resultados obtidos com

o método de regressão linear que aparecem na Eq. 7, chegamos aos seguintes valores para as densidades dos líquidos usados:

$$\begin{aligned} \rho_{ag} &= (0,990 \pm 0,015) \text{ g/mL} \\ \rho_{gl} &= (1,237 \pm 0,019) \text{ g/mL} . \end{aligned} \quad (10)$$

Comparando-se os resultados acima com os valores apresentados na Seção 3.3, vemos que os resultados obtidos aqui estão em excelente acordo com os tabelados. Como um comentário final, cabe lembrar que, devido ao fato de a glicerina ser um composto químico higroscópico, a densidade obtida para ela, nas diversas vezes em que a experiência já foi realizada por diferentes grupos de alunos, é sistematicamente inferior ao seu valor conhecido.

Tabela 2 - Características e dimensões importantes de cada uma das partes do aparato que aparece na Fig. 1.

Características e dimensões importantes do aparato			
Elevador	veja Seção 4. e Fig. 4 para detalhes e dimensões		
Balança digital	carga máxima = 1.000 g sensibilidade = 0,2 g largura \times comprimento \times altura = 210 mm \times 292 mm \times 70 mm		
Proveta graduada	volume máximo = 250 mL volume mínimo = 25 mL sensibilidade = 2 mL diâmetro interno = 35 mm material = pirex		
Corpos metálicos	Antes da usinagem	Após	Comprimento
Cilindro de alumínio	diâmetro = 15/16"	23,2 mm	240 mm
Paralelepípedo de alumínio	lado = 3/4"	3/4"	245 mm
Cilindro de latão	diâmetro = 15/16"	23,2 mm	240 mm

3. O roteiro

Como já mencionado na introdução deste trabalho, a experiência descrita na seção anterior é uma das que compõem a disciplina Física Experimental 2, que é oferecida pelo IF-UFRJ. Esta disciplina faz parte da grade curricular obrigatória de todos os alunos dessa Universidade que estejam estudando em cursos das áreas de ciências matemáticas e naturais e de tecnologia, e é recomendada, na grande maioria destes cursos, como uma das disciplinas do segundo semestre da formação universitária. Os alunos têm 2 aulas de laboratório (cada uma com duração de 2 h) para executar as tarefas relacionadas à experiência em questão. Na primeira aula, os alunos entram em contato com o fenômeno físico e o modelo que está por trás da experiência e fazem toda a tomada dos dados experimentais. Na segunda aula, espera-se que grande parte da análise destes dados experimentais seja feita, podendo ter sido iniciada em atividades extra-laboratoriais entre a primeira e segunda aulas, e, se necessário, deve ser completada após esta última aula.

Nesta seção apresentaremos o guia que o aluno deve ter para executar a experiência descrita na seção ante-

rior. Cada subseção que segue é exatamente igual às seções do guia que tem como título *Empuxo*. Este guia é parte da apostila de título *Física Experimental 2 — Roteiros*, escrita pelos autores do presente trabalho durante a já mencionada reformulação de tal disciplina, que contém outros guias para as demais experiências abordadas com a mesma estrutura que o apresentado à seguir.

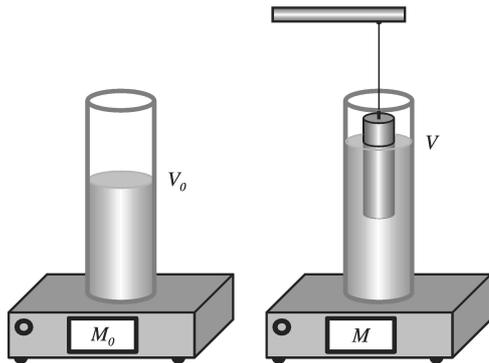
3.1. Objetivos

Os objetivos que pretende-se alcançar com a presente proposta são bastante claros: a determinação experimental do empuxo que aparece nos corpos quando imersos total ou parcialmente em um fluido e a determinação da dependência da intensidade do empuxo com a variação de alguns parâmetros relevantes do sistema.

3.2. Modelo

Considere a situação descrita a seguir: um recipiente, inicialmente contendo um volume V_0 de um certo líquido, é colocado sobre uma balança que registra uma massa M_0 , como mostra a próxima figura. Um corpo

suspensão por um fio é mergulhado no recipiente, elevando o volume do líquido para V e a massa registrada na balança para M .



Propõe-se então que:

- Usando o princípio de Arquimedes, mostre que a intensidade do empuxo (E) sobre o corpo é dada por:

$$E = \rho_\ell(V - V_0)g, \quad (11)$$

onde ρ_ℓ é a densidade volumétrica de massa do líquido e g é a intensidade da aceleração da gravidade.

- Com o objetivo de determinar E , faça os diagramas de forças que atuam sobre o corpo, no sistema recipiente-líquido e na balança.
- Com estes diagramas, mostre que E pode ser obtido, usando as massas medidas na balança, a partir de:

$$E = (M - M_0)g. \quad (12)$$

Para uma melhor compreensão do assunto, sugerimos a leitura das Refs. [2, 3] que aparecem na bibliografia.

3.3. Material utilizado

- elevador,
- balança,
- proveta graduada,
- água ($\rho \approx 0,997 \text{ g/mL}$),
- glicerina ($\rho \approx 1,26 \text{ g/mL}$),
- cilindro de alumínio ($\rho \approx 2,5 \text{ g/mL}$),
- cilindro de latão ($\rho \approx 8,5 \text{ g/mL}$),
- paralelepípedo de alumínio.

3.4. Procedimento experimental

Para a realização do experimento, siga os seguintes passos:

- Coloque 150 mL de água ou glicerina na proveta graduada.
- Meça a massa do arranjo proveta-líquido.

- Escolha uma das peças metálicas e a mergulhe gradativamente neste líquido. Para cada volume V obtido com a imersão de parte da peça, meça a massa registrada na balança.
- Repita este procedimento para as outras duas peças, escolhendo valores de volume diferentes para cada uma das peças.
- Utilize o outro líquido e repita a experiência. Agora você só precisa utilizar uma única peça.

Obs.: Não se esqueça de que todo dado experimental deve ser apresentado com uma estimativa para a sua incerteza.

3.5. Análise de dados

Explore seus resultados da seguinte forma:

- Com os dados experimentais coletados, construa uma tabela para cada líquido usado que contenha as quantidades: V , M , $V - V_0$ e E/g . Diferencie em cada tabela os dados relativos a cada peça. Qual dos dois conjuntos de dados experimentais, $V - V_0$ e E/g , apresenta o menor erro relativo?
- Faça um gráfico de $(V - V_0) \times E/g$. Inclua neste gráfico os dados relativos aos dois líquidos usados e use um símbolo diferente para cada tipo de peça. Observando este gráfico, você poderia afirmar que o empuxo sobre as peças depende do líquido onde elas foram imersas? Você poderia afirmar que ele depende da densidade volumétrica de massa e/ou da forma das peças? Observando o gráfico, qual é o comportamento do empuxo como função do volume de líquido deslocado ($V - V_0$) pela imersão do corpo?
- Usando regressão linear, determine os coeficientes das retas que melhor se ajustem a seus dados. Qual seria o problema de fazer o ajuste de $E/g \times (V - V_0)$? Trace estas retas no seu gráfico.
- Os valores dos coeficientes das retas ajustadas estão de acordo com o que poderia ser esperado? Os seus resultados estão de acordo com o princípio de Arquimedes?

4. O aparato

O objetivo desta seção é dar as características e as dimensões de cada um dos elementos que compõem o aparato experimental utilizado para realizar a experiência descrita na Seção 2, de modo a facilitar a reprodução dele por outras pessoas interessadas em implementar o experimento descrito neste trabalho em alguma disciplina de física experimental. Uma fotografia do arranjo experimental pronto para ser utilizado já foi apresentada na Fig. 1.

Cada aparato experimental completo é composto de um elevador, uma balança digital, uma proveta graduada e três corpos metálicos em forma de barra. Com exceção do elevador que será detalhado logo abaixo, a Tabela 2 contém as características e dimensões dos demais componentes do aparato em questão que julgamos serem suficientes para implementações futuras. No centro de uma das extremidades de cada corpo metálico existe um parafuso atarraxado nela, que possui uma arruela metálica soldada na sua cabeça para servir de

argola para pendurar este objeto no elevador.

Na Fig. 4 apresentamos os detalhes necessários para a reprodução do elevador usado no aparato em questão. Em suma, ele é constituído de uma base, uma coluna e uma barra roscada, que é a responsável pelos deslocamentos verticais gradativos do corpo metálico que deve ser mergulhado no líquido dentro da proveta durante a experiência. A base do elevador foi feita de chapas de aço-carbono 1020 e sua coluna construída a partir de uma viga U de alumínio.

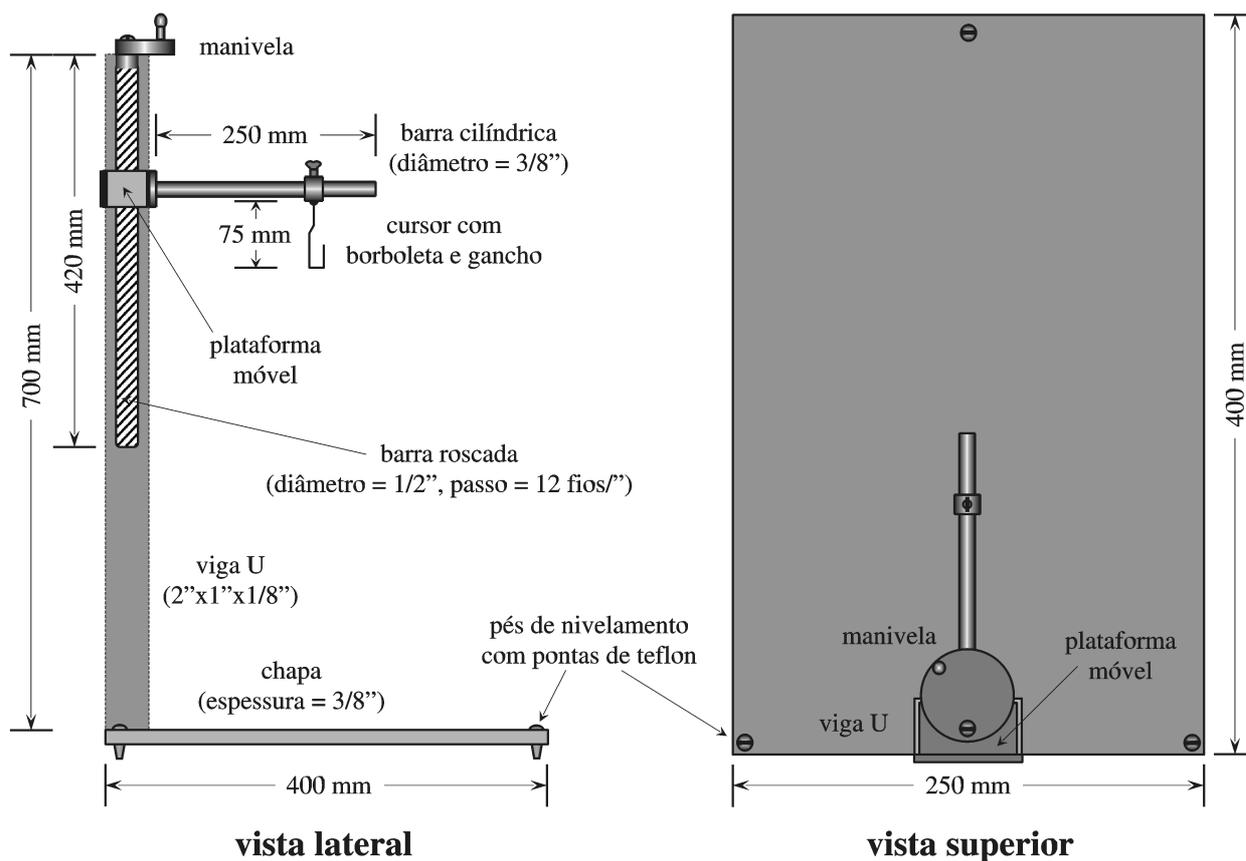


Figura 4 - Detalhes para a reprodução do elevador que aparece na Fig. 1.

Como uma observação final, é bom lembrar que todas as dimensões dos componentes do presente aparato experimental foram projetadas de forma a ser possível usar, no lugar da balança digital, uma balança de braço de precisão, sem qualquer transtorno.

5. Comentários finais

Apesar da experiência apresentada neste trabalho estar dirigida para uma disciplina de física experimental do ensino superior, nada impede que ela seja implementada no ensino médio, bastando, para isto, fazer algumas simplificações na parte relativa à análise dos

dados experimentais. Tais simplificações deveriam envolver, talvez, uma atenuação das discussões relativas à propagação de incertezas e a substituição do método de regressão linear pelo ajuste visual de uma reta aos pontos experimentais o que possibilitaria, também, a determinação dos parâmetros desta reta.

Finalmente, esperamos com este trabalho facilitar a implementação de uma experiência que vise o estudo do princípio de Arquimedes em outros lugares e por outras pessoas. Em resumo, copiem, reproduzam, usem, modifiquem e façam bom proveito da experiência descrita aqui.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos técnicos em mecânica Francisco de Souza Oliveira e Sidnei Alexandre da Silva, que trabalharam na construção do elevador, e a Agostinho Mendes da Cunha e ao Laboratório de Auxílio Didático do Instituto de Física (LADIF) da UFRJ, pela execução da fotografia que aparece na Fig. 1. Também gostaríamos de agradecer ao Prof. Armando Nazareno Faria Aleixo do IF-UFRJ pela execução dos desenhos que aparecem nas Figs. 2 e 4 e pela leitura cuidadosa da versão final do presente trabalho.

Referências

- [1] C. Rorres, *Archimedes*, <http://www.mcs.drexel.edu/~crrorres/Archimedes/contents.html>.
- [2] D. Halliday, R. Resnick e K.S. Krane, *Física 2* (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1996), 4^a ed.
- [3] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica, v. 2: Fluidos, Oscilações e Ondas e Calor* (Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1996), 3^a ed.
- [4] J.H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros* (Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1996), 2^a ed.