

## História da Física e Ciências Afins

# A densidade e a evolução do densímetro

(Density and the evolution of the densitometer)

Bruno de Moura Oliveira, João Massena Melo Filho, Júlio Carlos Afonso<sup>1</sup>

*Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Recebido em 11/11/2011; Aceito em 19/3/2012; Publicado em 18/2/2013

Este trabalho passa em revista o conceito de densidade e descreve o densímetro, instrumento destinado a medir a densidade de líquidos puros ou soluções sem o auxílio de uma balança. A concepção do densímetro se baseia no princípio de Arquimedes (flutuabilidade). O emprego desse instrumento ganhou impulso a partir do século XVII. Duas versões foram propostas: os de volume constante e os de peso constante. O formato básico praticamente não mudou em mais de 250 anos. A evolução mais perceptível se deu no elemento de equilíbrio (lastro), que passou do mercúrio líquido às bolas de chumbo unidas por resina hoje em dia. O densímetro é um instrumento prático e barato para se realizar experiências simples que despertam nos jovens a inserção da química e da física no cotidiano, e mostram a importância da densidade no controle de qualidade de produtos (como o etanol combustível e bebidas).

**Palavras-chave:** densímetro, densidade, empuxo.

This work presents the definition of density and describes the densitometer, apparatus which measures density of pure liquids or solution without the use of a balance. The conception of the densitometer is based on the Archimedes's Principle (floatation). The use of this instrument was greatly accelerated in the XVII century. Two models were proposed: constant weight and constant volume. Its basic format has not changed much over the last 250 years. The most interesting evolution was the change of the ballast: from liquid mercury to solid lead balls fixed by a resin. The densitometer is a cheap and practical apparatus to make some simple experiences that show the importance of the density in chemistry and physics and in our everyday life, as well as in the quality control of some goods (like ethanol and beverages) via density measurement.

**Keywords:** densimeter, density, buoyancy.

## 1. O que é densidade?

A massa ( $M$ ) e o volume ( $V$ ) são propriedades gerais de um corpo material. Densidade absoluta (ou simplesmente densidade,  $d$ ), ou massa específica ( $\rho$ ) de um corpo homogêneo é a razão entre sua massa  $M$  e seu volume  $V$ . Ela pode ser expressa em quilograma por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) ou grama por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ). O termo corpo homogêneo se refere aos materiais que têm composição uniforme ao longo de toda sua extensão [1,2].

$$d \text{ ou } \rho = \frac{M}{V}, \text{ onde } M = \rho V \text{ e } V = \frac{M}{\rho}. \quad (1)$$

Define-se densidade relativa a relação entre a densidade de um corpo ( $\rho$ ) e a de outro definido como padrão ( $\rho_{pad}$ ). Trata-se de uma grandeza adimensional

$$\rho_{relat} = \frac{\rho}{\rho_{pad}}. \quad (2)$$

<sup>1</sup>E-mail: julio@iq.ufrj.br.

Em geral, como padrão de referência [3-5], empregase água destilada à temperatura de 4 °C, cuja densidade é 1  $\text{g/cm}^3$  (ou, mais rigorosamente, 0,999973  $\text{g/cm}^3$  a 3,98 °C). Assim, segundo a Eq. (2), para os corpos sólidos e líquidos a densidade absoluta e a relativa são representadas pelo mesmo número quando a referência é a água a 4 °C.

Nesse momento, convém distinguir massa específica de peso específico ( $p$ ). Este último é definido como o peso da unidade de volume de um corpo. Pode ser expresso em  $\text{N/m}^3$  ou  $\text{dyn/cm}^3$  [4,5]. Obtém-se o peso específico de um corpo homogêneo dividindo seu peso  $P$  por seu volume  $V$ .

$$p = \frac{P}{V} \text{ ou } \frac{Mg}{V}. \quad (3)$$

A partir da definição de massa específica (Eq. (1)), o peso específico se expressa por

$$p = \rho g. \quad (4)$$

Define-se peso específico relativo ( $\pi$ ) a relação entre o peso específico ( $p$ ) de um corpo e o peso específico ( $P$ ) de outro corpo escolhido como padrão

$$\pi = \frac{p}{P}. \quad (5)$$

De acordo com a Eq. (4), pode se escrever

$$\pi = \frac{\rho g}{\rho_{pad} g} = \frac{\rho}{\rho_{pad}}. \quad (6)$$

Na Eq. (6),  $\rho_{pad}$  normalmente representa a massa de 1 cm<sup>3</sup> de água destilada a 4 °C (1 g). Isso indica que a densidade relativa e o peso específico relativo, tomados em relação ao mesmo padrão (água a 4 °C), são numericamente iguais, embora tenham significados distintos. Devido a essa igualdade numérica essas grandezas eram tratadas no passado como sinônimos. Antigamente, essa relação também era conhecida como gravidade específica. Esse termo é totalmente inadequado, pois nada tem a ver com gravidade [2], mas ainda é usada em vários segmentos industriais (bebidas, refino de petróleo). Na área científica, o termo mais empregado hoje é densidade relativa. [5].

De acordo com a definição expressa pela Eq. (1), para obter a densidade de um corpo sólido ou líquido é necessário: a) determinar a massa  $M$  em gramas do corpo cuja densidade se deseja, por meio de uma balança [6]; b) estabelecer uma medida precisa do volume ocupado por essa massa. No caso específico de líquidos, cilindros graduados, balões volumétricos e, particularmente, picnômetros [6-10] são usados para essa finalidade.

## 2. O densímetro

O densímetro é um instrumento que indica a densidade de líquidos sem o auxílio de uma balança. Apesar de hoje o termo “densímetro” referir-se genericamente a todo instrumento desse tipo, historicamente eram empregados dois termos [1,3,4]: aerômetro e hidrômetro. O termo aerômetro se aplica ao instrumento destinado a determinar a massa ou a densidade de gases confinados em recipientes rígidos, mas logo também passou a designar as medidas de densidades de líquidos em relação ao ar ( $d \approx 1,2$  g/L a 25 °C). Já o hidrômetro refere-se à medida de densidade de líquidos puros ou de soluções. Hoje ele é empregado para referir-se ao instrumento que mede o consumo de água por meio da medida de vazão. Não se deve confundir hidrômetro com higrômetro, que visa determinar a umidade relativa do ar [8]. O termo

densímetro abrange ambos os termos históricos por representar, na verdade, uma mesma finalidade: a medida de uma densidade. Por isso, neste trabalho, os termos aerômetro e hidrômetro serão usados como sinônimo de densímetro.

## 3. Princípio de funcionamento do densímetro

O densímetro funciona com base no fenômeno da flutuabilidade. Um corpo flutua quando ele se encontra em equilíbrio sob a ação conjunta apenas das forças de gravidade (força peso) e de empuxo [1,2,11]. Para um corpo flutuante é satisfeita a condição  $P = I$ , ou seja, a força peso é igual ao empuxo. Portanto o peso aparente do corpo flutuante é nulo [2]. Denomina-se peso aparente de um corpo a diferença entre sua força peso  $P$  e a intensidade  $I$  do empuxo [9]

$$P_{ap} = P - I. \quad (7)$$

O peso aparente mede a resultante das forças de gravidade e do empuxo que atuam no corpo. Tem-se  $P_{ap} > 0$  quando  $P > I$ , e  $P_{ap} < 0$  quando  $P < I$ . Um corpo abandonado no seio de um fluido vai ao fundo quando seu peso aparente é positivo, aflora quando seu peso aparente é negativo e permanece estacionário quando seu peso aparente é nulo.

Dividindo a igualdade  $P = I$ , membro a membro, por  $g$  (aceleração da gravidade)

$$m = m_{fluido\ deslocado}. \quad (8)$$

A massa de um corpo flutuante é igual à massa do fluido que ele desloca [2].

O centro de massa  $\mathbf{C}$  e o centro de impulsão  $\mathbf{C}_i$  do corpo flutuante situam-se numa mesma vertical. Inclinando-se o corpo ligeiramente, o centro de impulsão geralmente se desloca; a vertical pelo novo centro de impulsão intercepta a reta  $\mathbf{I}$  em um ponto  $\mathbf{M}$  denominado metacentro. O equilíbrio do corpo flutuante é estável (a) quando  $\mathbf{M}$  se situa acima de  $\mathbf{C}$ ; indiferente (b) quando  $\mathbf{M}$  coincide com  $\mathbf{C}$ ; instável (c) quando  $\mathbf{M}$  se situa abaixo de  $\mathbf{C}$  (Fig. 1). O densímetro é projetado para a situação (a). O densímetro é uma das muitas aplicações do Princípio de Arquimedes (287-212 aC) [2,13-15].

Os densímetros são constituídos por duas partes, conforme visto na Fig. 2. A haste e o bulbo (ou ampola) têm formato cilíndrico. Geralmente são feitos de vidro, são ocos, e o lastro é, o mais das vezes, chumbo ( $d = 11,3$  g/cm<sup>3</sup>) ou mercúrio ( $d = 13,6$  g/cm<sup>3</sup>). O lastro se situa na extremidade inferior do bulbo, o que permite que o densímetro, introduzido num líquido, flutue em posição vertical [7,14,15].

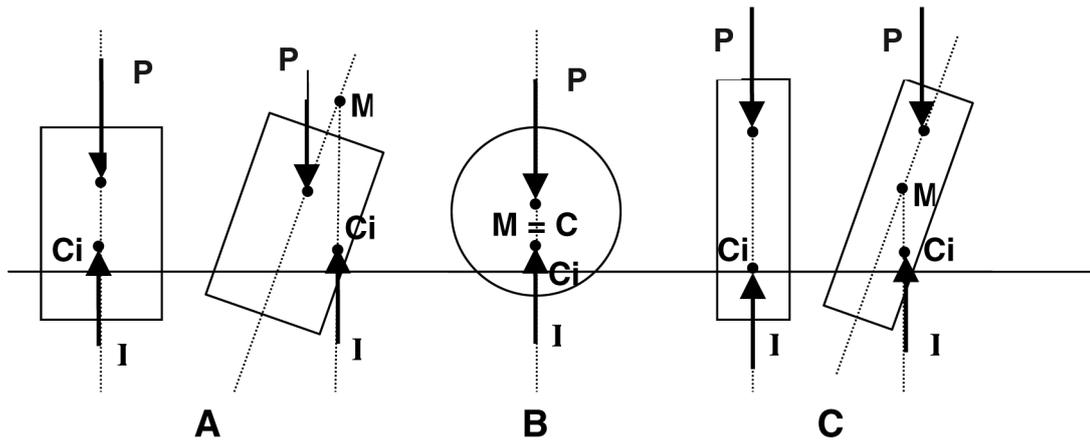


Figura 1 - Tipos de equilíbrio num corpo flutuante (adaptado da Ref. [5])

A haste contém uma escala proveniente de uma calibração, a qual permite a leitura da densidade do líquido (ou outra grandeza associada a ele). A relação entre o volume e a massa do bulbo é o principal fator no estabelecimento dos limites superior e inferior da escala, ou seja, o intervalo de densidades que o densímetro pode medir.

O densímetro tem de flutuar, em equilíbrio estável, nos líquidos cujas densidades se quer medir. Isto é, não pode ser pesado demais, a ponto de bater no fundo do recipiente em que é colocado, nem leve demais, a ponto de sua escala ficar fora da interface líquido-ar, que onde se dá a leitura. A profundidade da posição de equilíbrio deve ser função da densidade do líquido. Assim, a dimensão da haste é fundamental para estabelecer a dependência entre a densidade do líquido e a profundidade de equilíbrio [1,13,14].

No equilíbrio [14], o empuxo  $I$  provocado pelo deslocamento do fluido deve compensar exatamente a força peso  $P$  do densímetro, que é o peso  $P_b$  do bulbo mais o peso  $P_h$  da haste, relacionados às suas respectivas massas,  $m_b$  e  $m_h$  e à aceleração da gravidade  $g$  por

$$P = P_b + P_h = (m_b + m_h)g. \quad (9)$$

O empuxo é o produto do volume  $V_L$  de líquido deslocado pela sua densidade  $d_L$  e pela aceleração da gravidade  $g$

$$I = V_L d_L g. \quad (10)$$

O volume  $V_L$  de líquido deslocado corresponde exatamente ao volume submerso do objeto, que é o volume  $V_b$  do bulbo mais o volume  $V_h$  da porção de altura  $h$  da haste que está submersa

$$V_L = V_b + V_h, \quad (11)$$

assim

$$(m_b + m_h)g = (V_b + V_h)d_L g. \quad (12)$$

A escala de densidade está diretamente relacionada à altura  $h$  da porção submersa da haste, e não do seu volume. Por isso, o volume da haste de um densímetro deve ser descrito como função da área de sua seção transversal e da altura submersa  $h$ :  $V_h = A_t h$ . A massa da haste pode ser descrita em função de sua densidade  $\lambda_h$  e da sua altura submersa  $h$ :  $m_h = \lambda_h h$ . O volume do bulbo também pode ser escrito em função de sua massa  $m_b$  e de sua densidade  $d_b$ :  $V_b = m_b/d_b$ .

Desse modo, a equação de equilíbrio fica

$$(m_b + \lambda_h h)g = (m_b/d_b + A_t h)d_L g. \quad (13)$$

Isolando  $h$ , a porção da haste submersa, tem-se

$$h = m_b(d_L/d_b - 1)/(\lambda_h - A_t d_L). \quad (14)$$

Como  $m_b = d_b V_b$ , substituindo na expressão 14, chega-se à expressão final

$$h = V_b(d_b/d_L - 1)/(A_t - \lambda_h/d_L). \quad (15)$$



Figura 2 - Esquema clássico de um densímetro. O lastro se localiza na parte inferior do instrumento.

A altura  $h$  aumenta com o volume e a densidade do bulbo. A satisfação simultânea desses dois critérios é incompatível com materiais homogêneos [1,14,15]: para uma dada massa, quanto maior a densidade, menor será o volume. Assim, os densímetros utilizam bulbos não homogêneos. Na prática (Fig. 4), o lastro (no caso, mercúrio) possui densidade bem diferente do vidro ( $d_{\text{vidro}}$  entre 2,4 e 2,8 g/cm<sup>3</sup>). Tal diferença tem outra vantagem na construção do instrumento, que é facilitar o alinhamento do densímetro com a vertical, de acordo com as condições do equilíbrio estável (Fig. 1).

A fabricação do densímetro exige que o vidro seja homogêneo em toda a sua extensão, e que as seções retas do bulbo e da haste sejam constantes [7,15-17]. A colocação do lastro deve levar em conta o nível de profundidade que o densímetro pode trabalhar, função da faixa de densidade que se deseja medir. A parte inferior do bulbo é então selada a fogo.

A calibração (gradação da haste) é função da utilização do densímetro. Esse instrumento é adequado para a determinação da densidade de líquidos puros ou de soluções de um determinado soluto [7,15-17]. No primeiro caso, para que a calibração seja consistente, devem-se empregar líquidos assemelhados (ou idênticos) àqueles a serem analisados. Ao colocar um densímetro em um líquido o empuxo variará segundo a densidade: se o líquido for mais denso, a parte do instrumento imersa será menor do que no caso do líquido menos denso, onde o densímetro afunda mais. Conhecendo as densidades correspondentes às duas marcações extremas da haste, divide-se o intervalo em partes proporcionais. Assim, o densímetro fica graduado para densidades intermediárias. No caso de soluções de um soluto, os extremos são obtidos empregando-se solvente puro e a solução saturada do soluto na temperatura em que se dará a determinação da densidade.

A calibração é realizada a uma temperatura de referência, a qual é indicada no densímetro. Para emprego em outras temperaturas, é preciso empregar uma tabela de fatores de correção, que levam em conta a dilatação do vidro. Depois da calibração coloca-se a escala indicativa de densidade na parte interna da haste, por meio de uma fita de papel de formato cilíndrico concêntrico com o eixo da haste. Ela permite uma leitura com incerteza máxima de  $\pm 0,001$ , conforme a precisão desejada. A fita de papel precisa ser rigorosamente colocada na posição conforme a calibração efetuada; a impressão e a introdução da escala na haste são etapas delicadas [3,4,7]. A haste é fechada na parte superior por solda a fogo.

Ao se fazer uma leitura com um densímetro, este deve estar rigorosamente limpo e seco. Antes de mergulhar o densímetro, é aconselhável agitar o líquido com um bastão de vidro para assegurar a homogeneidade do mesmo [16]. A temperatura do ambiente deve ser monitorada para verificar a necessidade de correções da medida de densidade. A temperatura máxima de operação

dos densímetros é da ordem de 70 °C [16]. No manuseio, nunca se deve tocar com as mãos as partes que mergulharão no líquido, somente pela parte superior que ficará exposta ao ar. A haste deve ser rigorosamente cilíndrica para que a interface líquido-ar (menisco) seja uniforme, e a haste não deve molhar mais do que 5 mm acima do nível de leitura. As leituras somente devem ser feitas quando o densímetro para de oscilar no seio do líquido (entra em repouso). Da mesma forma, o densímetro não pode encostar na parede do recipiente que contém o líquido sob análise. O olho humano deve se posicionar na altura da superfície do líquido a fim de realizar a leitura sem os erros de paralaxe e da refração da luz no líquido [7,15,16]. A leitura se faz pelo menisco inferior (líquidos transparentes) ou superior (caso dos líquidos não transparentes) [8, 16].

Em geral, a escala da haste de um densímetro indica diretamente a densidade dos líquidos em que flutua. No caso de soluções de solutos dissolvidos, outra possibilidade é colocar a escala da haste em termos de concentração de soluto dissolvido. Isso decorre do fato de a densidade dessas soluções variar com a referida concentração [1,18]. Esta última pode ser expressa em termos de %  $m/m$  ou  $p/p$ , ou ainda %  $vol/vol$  (no caso de solutos líquidos). Em densímetros mais antigos, a escala era frequentemente expressa em valores de densidade relativa à água a 4 °C (Eq. (2)).

Os densímetros recebem nomes diversos conforme o tipo de solução a que se destinam, por exemplo: pesa-ácidos (acidímetros), pesa-sais (salímetros), pesa-xaropes (sacarímetros), lactômetros (leite). Os densímetros destinados a líquidos menos densos que a água denominam-se pesa-éteres, pesa-espíritos ou pesa-lícores [1,4,8,18].

## 4. A evolução do densímetro

### 4.1. Dos primórdios ao século XVII [17,19,20]

Os primeiros relatos sobre a existência do densímetro talvez se devam ao matemático alexandrino Pappos (290-350). Em 410, Sinésio (373-414), bispo de Ptolemais, menciona, numa carta à filósofa Hipátia (ca. 355-415), um aerômetro constituído de folhas de prata. A julgar pelo conteúdo dessa carta, ele considerava o instrumento uma novidade. A obra *De Ponderibus et Mensuris* (escrita em 1599 por Juan de Marana, 1536-1624), cita um aerômetro construído segundo Rêmio Fânio Paláemon, no século I d.C. Embora seja difícil afirmar quem teria sido seu inventor, pode-se afirmar que o densímetro é uma invenção muito antiga. Em 1121, o árabe Al-Khazini descreve um instrumento semelhante ao de Sinésio. Sua obra, *Kitab Mizan al-Hikna* (O Livro da Balança da Sabedoria), em 4 volumes, dedica os volumes 2 a 4 à hidrostática (parte da física que estuda os fluidos em repouso), com ênfase na determinação das densidades de 51 substâncias (me-

tais, ligas, soluções salinas e líquidos diversos). Al-Khazini atribuiu a Pappos a invenção do densímetro. Johann Thölde (1565-1614), por volta de 1600, determinou com um aerômetro o conteúdo das lixívias de sal (NaCl, KCl) da salina de Frankenhausen (Alemanha); trata-se de um dos primeiros casos documentados em que se relaciona a densidade à concentração de um soluto dissolvido. Van Helmont (1577-1644) introduziu o densímetro no exame da urina de doentes, e Denis Dordart (1634-1707) estudou em 1669 a densidade de uma série de destilados.

A tecnologia de construção e emprego do densímetro evoluiu notavelmente no século XVII. Robert Boyle (1627-1691), químico e físico inglês, construiu em 1676 um aerômetro de vidro, tendo na esfera inferior um lastro de mercúrio (Fig. 3); ele introduziu o uso de aerômetros para determinar a densidade de determinados líquidos, como vinhos e cervejas [13, 21, 22].

Em 1663, o matemático francês Gilles Personne de Roberval (1602-1675) construiu o chamado aerômetro de pesagem, destinado à determinação da densidade de líquidos. Este instrumento consiste de uma bola de vidro, carregada com mercúrio, contendo um cone. Ele flutua nos líquidos sempre com o cone para cima (Fig. 3). Neste cone colocam-se pesos anulares até que ele mergulhe completamente no líquido a examinar, exatamente até a sua ponta. Há também citações que atribuem a invenção desse instrumento ao médico e explorador Balthasar de Monconys (1611-1665) [23]. Seja como for, o fato é que esse instrumento era muito inexato, pois os pesos também mergulhavam no líquido, deslocando-o [22].

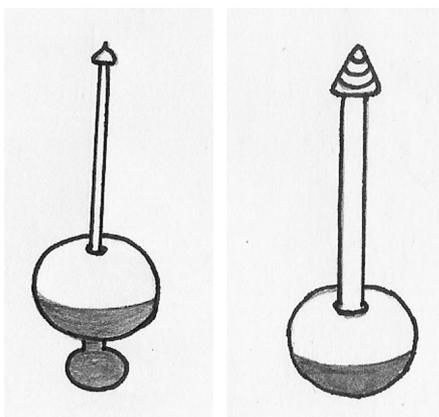


Figura 3 - Desenhos do aerômetro proposto por Boyle (1676, esquerda) e do aerômetro de Roberval (1663, direita), com base na Ref. [22].

#### 4.2. Século XVIII - a diversificação do densímetro

Nesse século foram desenvolvidos dois tipos de densímetro: a) os de volume constante, que servem para medir as densidades de sólidos e líquidos através da colocação de corpos denominados “pesos” em pra-

tos fixados em suas hastes. O princípio é não variar o volume deslocado pelo instrumento, pois ele deverá afundar até uma marca pré-determinada localizada em sua haste que se chama ponto de afloramento; b) os de peso constante, que não empregam pesos; determina-se apenas o volume do líquido deslocado pelo corpo.

##### 4.2.1. Aerômetros de volume constante

**Aerômetro de Nicholson** - William Nicholson (1753-1815), químico inglês e descobridor do processo de eletrólise da água, propôs em 1790 um aerômetro engenhoso destinado à determinação da densidade de corpos sólidos [13,14, 21]. Ele é constituído por um bulbo cilíndrico, limitado por dois cones, (Fig. 4). Na extremidade superior há uma haste que sustenta um pequeno prato e a inferior é munida de um gancho no qual se prende uma cesta. Uma marca colocada na haste indica o ponto de afloramento [22]. O lastro pode se localizar tanto no bulbo como na cesta [14].

Coloca-se uma amostra do corpo no prato e introduz-se o instrumento na água, tendo o cuidado de adicionar os pesos necessários para que o afloramento se dê na marca da haste. Se o corpo for menos denso que a água, ele é colocado na cesta [15]. Substitui-se em seguida o corpo por pesos marcados  $M$ . Estes representam a massa do corpo. Retiram-se estes pesos e coloca-se o corpo na cesta, introduzindo de novo o instrumento na água. Para que o afloramento se produza na marca é necessário juntar pesos  $M'$  ao prato. Estes pesos correspondem ao empuxo produzido pelo corpo, e a densidade procurada é

$$d = \frac{M}{M'}. \quad (16)$$

**Aerômetro de Fahrenheit** - físico e químico alemão, Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736) construiu um aerômetro constituído por uma ampola de vidro contendo na parte superior uma haste fina de vidro que suporta um pequeno prato, e na parte inferior um lastro de mercúrio. Com isso, ele eliminou a imprecisão do aerômetro de Roberval. Nesse prato, colocam-se pesos de maneira que o aerômetro afunde no líquido até uma marca feita na haste (o ponto de afloramento). Fahrenheit descreveu seu instrumento no artigo *Araeometri novi descriptio et usus* (1723) [13, 17, 21, 22].

O aerômetro de Fahrenheit permite determinar a densidade de líquidos. Para usá-lo é necessário conhecer primeiramente sua massa,  $P$ . Introduz-se em seguida o instrumento no líquido cuja densidade se deseja conhecer e juntam-se pesos marcados para que o afloramento se dê no ponto marcado na haste (Figs. 5 e 6) [15, 19].

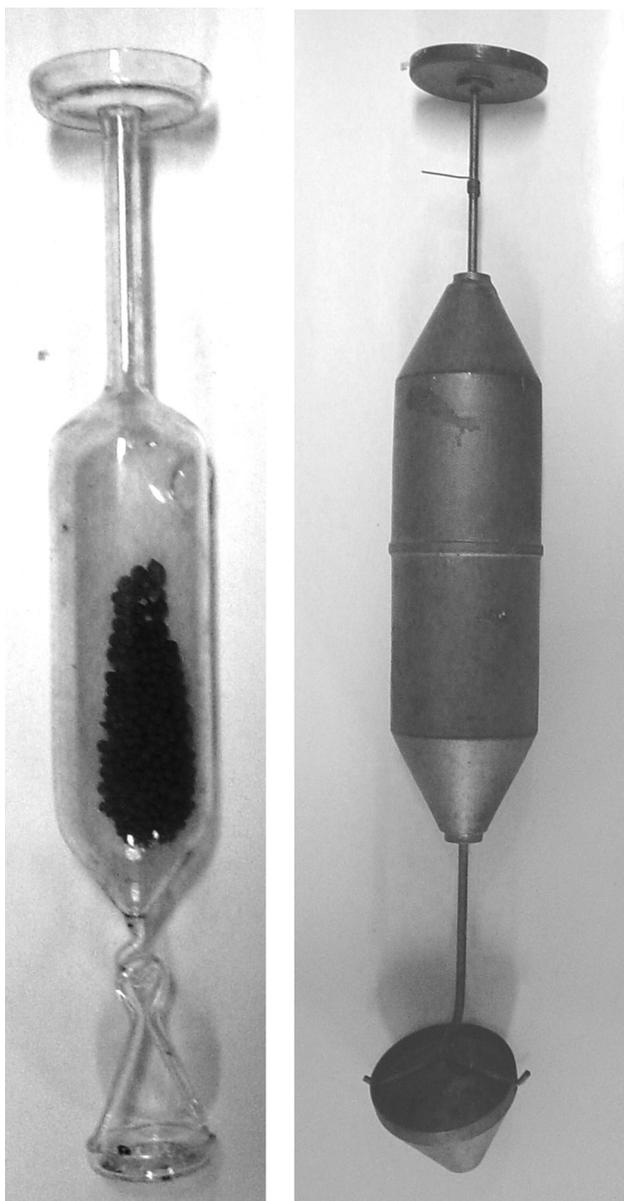


Figura 4 - Aerômetros de Nicholson, feito em vidro (esquerda) e cobre (direita), contendo lastro em chumbo (Acervo do Museu da Química Prof. Athos da Silveira Ramos, Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro).

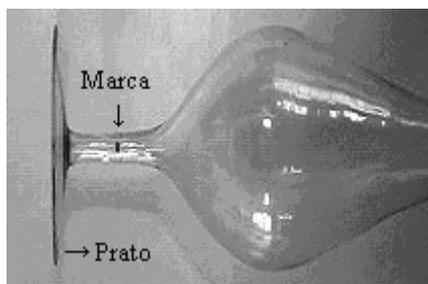


Figura 5 - Detalhe de um aerômetro de Fahrenheit, evidenciando a marca em sua haste.

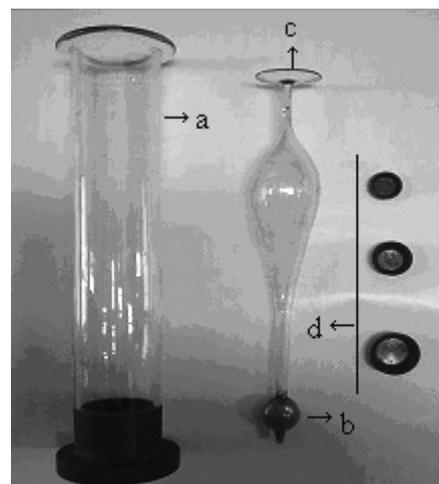


Figura 6 - Aerômetro de Fahrenheit, modelo do final do século XIX: a) proveta; b) lastro de Hg; c) prato; d) jogo de pesos 0,1, 0,5 e 1,0 g em latão (Acervo Museu da Química Prof. Athos da Silveira Ramos).

Seja  $p$  este peso. A massa total ( $P + p$ ) do sistema é igual à massa do líquido deslocado. Introduce-se depois o instrumento na água destilada. Seja  $p'$  o peso necessário para produzir o afloramento. A massa da água deslocada será

$$P + p', \quad (17)$$

e a densidade procurada é

$$d = \frac{(P + p)}{(P + p')}. \quad (18)$$

#### 4.2.2. Aerômetros de peso constante

**Hidrômetro de Baumé** [3, 4, 22] - Antoine Baumé (1728-1804), farmacêutico, químico industrial e botânico francês, desenvolveu um instrumento segundo o mesmo princípio e aprimorando o aerômetro de Boyle. Ele publicou na revista *L'Avant*, em 1768, instruções para a fabricação de diversos hidrômetros para fins industriais. Em pouco tempo, foram sendo adotados por conta da facilidade de produção em série e de suas escalas serem de uso universal. São até hoje amplamente utilizados em laboratórios e processos industriais para soluções e líquidos puros, e por isso são muito conhecidos como higrômetros ou aerômetros de Baumé [13, 22]. A forma dos densímetros atuais (Fig. 2) têm origem no modelo proposto por Baumé.

Sua graduação é arbitrária e varia conforme se trata de instrumentos destinados a líquidos mais ou menos densos que a água [3, 22]. Os primeiros são construídos de modo a mergulhar até a extremidade superior da haste, quando introduzidos na água destilada, e os segundos mergulham apenas até a parte inferior da haste. Para graduar os hidrômetros destinados a líquidos mais densos que a água, marca-se zero no ponto de afloramento na água destilada e 15 no ponto de afloramento

em uma solução feita com 15 partes em massa de sal (cloreto de sódio) e 85 de água. O intervalo entre o zero e o 15 é dividido em 15 partes e a graduação é prolongada até cerca de 70 divisões (Tabela 1). No caso de instrumentos para líquidos menos densos, sua graduação é feita marcando zero no ponto de afloramento

numa solução feita com 10 partes em massa de sal e 90 de água. O grau 10 é marcado no ponto de afloramento na água pura. O intervalo entre as duas marcas é dividido em 10 partes iguais e a graduação prolongada até 70 divisões. Cada divisão é um grau Baumé em ambos os casos.

Tabela 1 - Correspondência entre os graus Baumé e as densidades a 15 °C [4].

Líquidos menos densos que a água		Líquidos mais densos que a água	
Grau Baumé (°Bé)	Densidade	Grau Baumé (°Bé)	Densidade
10	1,000	0	1,000
15	0,966	5	1,035
20	0,935	10	1,074
25	0,905	15	1,116
30	0,878	20	1,160
35	0,852	25	1,209
40	0,827	30	1,262
45	0,804	35	1,320
50	0,783	40	1,383
55	0,762	45	1,453
60	0,742	50	1,530
65	0,724	55	1,615
70	0,706	60	1,711

**Alcolímetro centesimal de Gay-Lussac [3, 4, 22]** - Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) físico e químico francês, desenvolveu um tipo especial de aerômetro que permite conhecer a porcentagem de etanol contida em uma mistura dele e água. Tem a forma comum dos densímetros. A Tabela 2 ilustra a correspondência entre a graduação Gay-Lussac e a densidade dessa mistura binária. Ao maior teor em etanol corresponde as menores densidades. Preparam-se misturas tomando sucessivamente 5, 10, 15, 20... 95 mL de etanol e completa-se a 100 mL com água destilada. Introduzindo-se o aparelho nessas misturas marca-se nos pontos de afloramento os valores respectivos 5, 10, 15, 20... 95, as quais indicam a porcentagem em volume de álcool da solução. As indicações desse densímetro são exatas apenas para as misturas de etanol e água. O ponto de afloramento do etanol absoluto corresponde a 100% GL (v/v). Os intervalos entre duas divisões consecutivas são divididos em diversas partes, conforme a precisão desejada.

Tabela 2 - Correspondência entre os graus do alcolímetro de Gay-Lussac e as densidades correspondentes a 15 °C para misturas etanol (100 °GL puro) e água (0 °GL pura) [4].

Grau GL	Densidade	Grau GL	Densidade
0	1,000	70	0,891
10	0,987	80	0,864
20	0,976	90	0,835
30	0,966	95	0,817
40	0,952	98	0,804
50	0,935	100	0,795
60	0,914		

A graduação é feita a uma temperatura de referência, geralmente 15 ou 20 °C, sendo necessário fazer

correções para outras temperaturas. Usa-se para isso tabelas de conversão, que levam em conta a expansão volumétrica (ou a contração) do vidro com a variação da temperatura.

### 4.3. Século XIX - o densímetro associado a um termômetro

O termômetro-densímetro surgiu no início do século XIX [20,22] e logo se tornou um instrumento extremamente importante na indústria e no ensino. Numa época em que a análise química ainda era incipiente, o emprego da determinação de propriedades físicas era extremamente importante para se caracterizar um dado material. Assim, grandezas como os pontos de fusão e de ebulição, o índice de refração, a densidade, a cor e outros parâmetros físico-químicos eram extremamente valiosos para os analistas [24]. A associação da temperatura com a densidade se explica pelo fato desta última variar com a primeira, como facilmente demonstrado em experiências de dilatação volumétrica de líquidos [1-4,9]. Até hoje, particularmente nas indústrias fermentativas, o termômetro-densímetro desempenha papel primordial, sendo também bastante usado em experimentos de físico-química e no preparo de soluções de ácidos e hidróxido de amônio, a partir da avaliação da concentração do material de partida por meio do referido instrumento. Exemplos de termômetros-densímetros podem ser encontrados na literatura [24, 25].

## 5. A evolução do densímetro em 160 anos (1850-2010)

A análise dos mais de 400 exemplares do acervo do Museu da Química Professor Athos da Silveira Ramos (instalado no Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro) mostra que, ao longo do período considerado, a principal diferença se refere ao elemento de equilíbrio (Figs. 7 e 8). Nas versões mais antigas, era utilizado o mercúrio (Fig. 7a), depois se passou a empregar bolinhas de chumbo (mais barato que o mercúrio [20]) fixadas com algodão (Fig. 7b); depois, essas bolinhas eram presas através de um estrangulamento feito no bulbo (Fig. 7c); em seguida, apareceram os modelos de bolinhas de chumbo fixadas com um disco de vidro (Fig. 7d); por fim, surgiram quase na mesma época o de chumbo fundido (Fig. 8), e a fixação das bolinhas de chumbo com resina (Fig. 7e).

Surgiu também uma nova forma de apresentação dos densímetros. Inicialmente, estima-se a densidade de uma solução com um densímetro de escala geral. A partir do valor lido na haste, retira-se o densímetro e coloca-se outro cuja faixa de valores é mais estreita, permitindo com isso uma leitura mais precisa do valor da densidade.

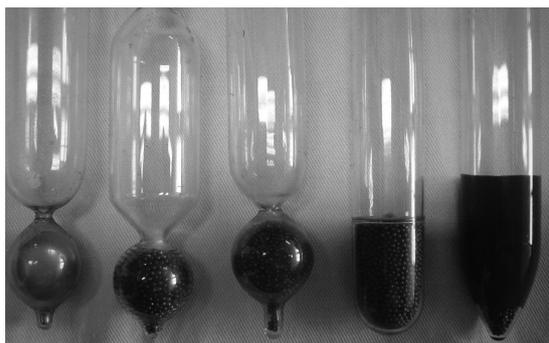


Figura 7 - A evolução do elemento de equilíbrio do densímetro. Da esquerda para a direita: (a) bulbo de mercúrio (década de 1890); (b e c) bolas de chumbo; o detalhe está na fixação: enquanto o da figura b (anos 1920) é fixado com algodão, o da figura c (anos 1930) é fixado por meio do estrangulamento do vidro; (d) bolas de chumbo imobilizadas por disco de vidro (anos 1950); (e) bolas de chumbo imobilizadas por resina (anos 1970).

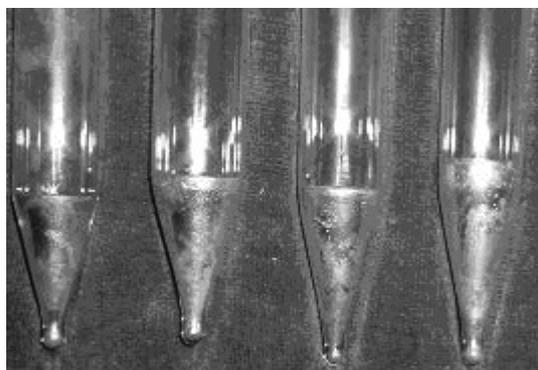


Figura 8 - O elemento de equilíbrio é o chumbo fundido (jogo de densímetros fabricado em 1954 nos EUA).

As Figs. 9 a 11 ilustram outros exemplos de densímetro, alguns dos quais apresentam peculiaridades em sua configuração.



Figura 9 - Densímetro de uso geral de escala dupla para líquidos mais densos (1,0-1,5, escala inferior) ou menos densos (0,7-1,0, escala superior) que a água; seu elemento de equilíbrio é o mercúrio. Fabricado na Alemanha no início do século XX.

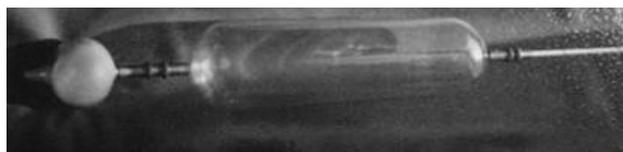


Figura 10 - Densímetro para densidade da água pura (0,98-1,00) em função da temperatura. Fabricado na Alemanha em 1860 ( $m = 4 \text{ kg}$ ).



Figura 11 - Densímetros para líquidos mais densos que a água ( $d = 1,00 \text{ a } 1,50$ ); o elemento de equilíbrio são bolas de chumbo seladas com algodão. O formato da ampola não é cilíndrico, e pouco se destaca em relação à haste. Fabricado nos Estados Unidos em 1943.

## 6. A importância da densidade

### 6.1. No cotidiano

A medida da densidade tem grande importância na caracterização de materiais [26]. O estado da bateria de um automóvel pode ser inferido pela medida de densidade do eletrólito, uma solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). À medida que a bateria descarrega esse ácido combina-se com o chumbo (Pb) nas placas da bateria formando sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ), insolúvel. Isso reduz a concentração do ácido (e a densidade) da solução. A densidade varia desde 1,30 g/mL numa bateria carregada até 1,15 g/mL numa descarregada. Essa medida é rotineiramente realizada em oficinas por meio de um densímetro [2]. A densidade do etanol nos postos de combustível é monitorada por densímetros que indicam se o produto está ou não dentro das especificações (especialmente quanto ao teor de água presente).

A área médica utiliza de muitas maneiras as medidas de densidade, como, por exemplo, testes em sangue e urina. A densidade normal do sangue humano encontra-se entre 1,04 e 1,06 g/mL [2]. Como a densidade aumenta com a concentração de células vermelhas, uma densidade anormalmente baixa pode indicar anemia. Da mesma forma, a densidade normal da urina é

de 1,02 g/mL [2]. Algumas doenças geram aumento na excreção de sais e elevação correspondente na densidade da urina.

O hidrômetro de Baumé ainda é hoje empregado na determinação do grau de acidez de produtos alimentícios como leite, licores etc. Em particular, o leite é um exemplo interessante. Sua densidade varia entre 1,023 e 1,040 g/mL, a 15 °C (3-6 °Bé). O leite com alto teor de gordura apresenta maior densidade em relação ao leite com baixo teor [15,21,27]. Bebidas contendo teores variados de etanol (cervejas, aguardentes e outros fermentados/destilados alcoólicos) são constantemente analisadas por meio de suas densidades [15,16]. A fabricação industrial de ácidos também ainda emprega densímetros com a escala em graus Baumé [14,26]. Por exemplo, o ácido sulfúrico puro tem 66 °Bé. O ácido comercial geralmente tem 60° Bé porque contém água. Com um densímetro, pode-se rapidamente saber se ácidos (assim como o etanol combustível) estão adulterados por adição de água. Desde a segunda metade do século XIX, as medidas de densidade são muito utilizadas como meio rápido de controle de qualidade de produtos líquidos [1,14].

## 6.2. No ensino

O densímetro é um recurso didático valioso desde o ensino fundamental, devido à facilidade de manipulação pelos alunos, situação reconhecida há bastante tempo no ensino de física [3, 8, 18]. Talvez por isso a construção de densímetros constituía a primeira das práticas envolvendo a densidade [8, 18]. É possível discutir com os alunos questões como flutuação, densidade, gravidade, empuxo, fazendo-se experimentos com densímetros mergulhados em diversos líquidos. Num estágio mais avançado, pode-se discutir a flutuabilidade de navios e submarinos.

A densidade é um conceito importante para entender o comportamento da água sob variações de temperatura. As substâncias, em sua maioria, se contraem quando solidificam (com isso a densidade aumenta), mas a água dilata-se (o gelo -  $d = 0,91 \text{ g/cm}^3$  - é menos denso do que a água). Em consequência do princípio de Arquimedes, um bloco de gelo fica imerso em cerca de 90% do seu volume. Isso faz com que os icebergs sejam muito perigosos para a navegação. Nos lugares muito frios, a água pode congelar-se, no radiador dos automóveis e nos encanamentos das casas, arrebentando-os. Evita-se isso colocando na água substâncias que só a deixam congelar a temperaturas muito abaixo de 0 °C [2]; o etilenoglicol é um exemplo comum em radiadores. Contudo, a expansão da água ao congelar-se é muito útil na agricultura. Ao congelar nas rachaduras extremamente finas das rochas, a água as fragmenta, contribuindo para a formação de solo arável. A célebre experiência de Thomas Charles Hope (1766-1844), esquematizada na Fig. 12, demonstra que a densidade da

água a 4 °C é a máxima [17,21,28].

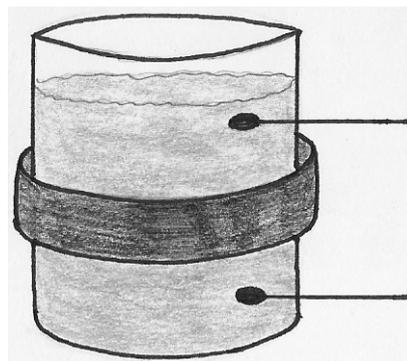


Figura 12 - Representação esquemática da experiência de Thomas Hope: o termômetro abaixo da cinta de gelo marca 4 °C, enquanto o termômetro superior indica uma temperatura próxima de 0 °C (adaptado das Refs. [21] e [28]).

Um experimento relativamente fácil de ser feito em sala de aula é verificar a diferença de densidade entre um mesmo refrigerante com e sem açúcar (*diet*). Nesse experimento, utilizam-se latas de mesma capacidade e um balde com água ligeiramente salgada. A quantidade de sal na água pode ser ajustada para destacar o experimento. Colocam-se as latas fechadas na água salgada. O refrigerante comum afunda, enquanto o refrigerante diet flutua. Como as latas em si têm a mesma massa e volume (pode-se constatar isso quando as latas estão vazias), conclui-se que a massa do refrigerante comum é maior que a massa do refrigerante diet. A densidade do refrigerante comum é maior devido à sacarose (açúcar) dissolvida, ausente na versão diet, tornando este menos denso.

O ovo flutua em água salgada e afunda na água doce [18]. Coloca-se um ovo num vasilhame com água. O ovo vai para o fundo do vasilhame. Adiciona-se sal (NaCl) à água. O ovo começa a flutuar à medida que a concentração do NaCl dissolvido aumenta. Pelo mesmo motivo, é mais fácil boiar na praia do que numa piscina: a água salgada é mais densa do que a água comum (Fig. 13) [18], bem como ninguém se afoga no Mar Morto, que contém a água mais salgada do mundo [9].

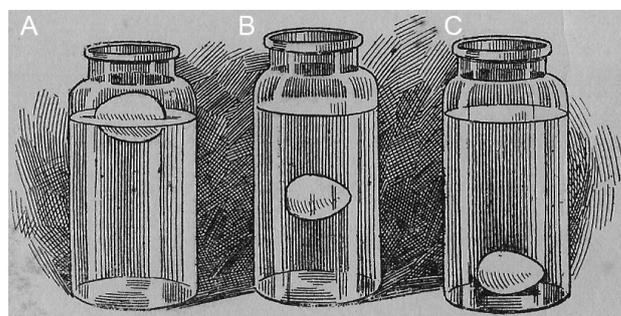


Figura 13 - Experimento didático de densidade em um livro de física experimental do início do século XX [18]: c: ovo em água doce; b e a: ovo em água progressivamente mais salgada [18].

## 7. Conclusões

O densímetro é uma engenhosa concepção a partir dos princípios de flutuabilidade de corpos sólidos em líquidos e da seleção de materiais que compõem o instrumento. Entretanto, sua evolução se mostrou bastante lenta por conta do empirismo que envolvia a densidade e os fenômenos a ela relacionados. A necessidade de emprego estimulou o aperfeiçoamento desse instrumento. Somente quando se conseguiu fabricar densímetros baratos e confiáveis é que ele se impôs como um item essencial em indústrias e laboratórios.

A evolução da física e da ciência em geral tornou o densímetro indispensável na descrição e na determinação das mais diversas substâncias, puras ou em solução. Esse instrumento pode substituir a balança na tarefa de determinação da densidade, visto que a pesagem é normalmente mais demorada do que a simples imersão de um densímetro no material a analisar.

A principal evolução do instrumento nos últimos 250 anos passou pela diversificação dos tipos de densímetro (peso e volume constante), pela associação com o termômetro, e pela mudança de seu elemento de equilíbrio, começando com o mercúrio e passando mais tarde para o emprego de bolas de chumbo unidas com resina polimérica. Apesar do advento dos modelos digitais o densímetro tradicional continua a ter importante papel na indústria, no comércio e no ensino.

## Agradecimentos

A P.R.Q. Afonso pelos desenhos das Figs. 1, 3 e 12.

## Referências

- [1] E. Hansmann and E.P. Slaik, *Physics* (Van Nostrand, New York, 1947).
- [2] F.W. Sears, M.W. Zemansky e H.D. Young, *Física* (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1984), 2<sup>a</sup> ed., v. 2.
- [3] O.B. Lourenço, *Física, Iniciação ao Estudo da Física Experimental para a Terceira Série Ginásial* (Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1936), 4<sup>a</sup> ed.
- [4] A. Freitas, *Curso de Física* (Companhia Melhoramentos, São Paulo, 1941), 4<sup>a</sup> ed.
- [5] S.J. Hawkes, *Journal of Chemical Education* **81**, 14 (2004).
- [6] J.C. Afonso e R.M. Silva, *Química Nova* **27**, 1021 (2004).
- [7] Por uma reunião de Professores. *Noções de Ciências Físicas e Naturaes - Physica e Chimica - Curso Médio* (Livraria Paulo de Azevedo e Cia., Rio de Janeiro, 1927).
- [8] S. Tamari, *Measurement Science and Technology* **15**, 549 (2004).
- [9] D.W. Ball, *Físico-Química* (Thomson Learning, São Paulo, 2005), v. 1.
- [10] A.T.N. Pires, M.A. Brito e S. Yunes, *Introdução ao Laboratório de Química* (Departamento de Química da UFSC, Florianópolis, 2009) apostila do II semestre de 2009.
- [11] R.C. Red, J.M. Prausnitz and T.K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids* (Mc.Graw-Hill, New York, 1977), 3<sup>a</sup> ed.
- [12] H.L. Silva, *Problemas Práticos de Physica Elementar* (Leite Ribeiro Livraria Editora, Rio de Janeiro, 1922), 3<sup>a</sup> ed., v. 2.
- [13] S.P. Oliver, *Dictionary of National Biography* (Oxford University Press, Londres, 1937), v. IV, XV e XVII.
- [14] Baú de Ciências: Densidade (coordenação Nelson Canziran da Silva, Depto. de Física da UFSC) <http://www.fsc.ufsc.br/~canzian/bau/index.html>, acessado em 23/10/2011.
- [15] W.G. Krauledat, *Práticas de Análises Volumétricas* (Editora da FTESM, Rio de Janeiro, 1969).
- [16] Catálogo *Medição de Temperatura e Densidade* (Brand, São Paulo, 2008).
- [17] E. Hoppe, *Historie de la Physique* (Payot, Paris, 1928).
- [18] H.L. Silva, *Problemas Práticos de Physica Elementar* (Leite Ribeiro Livraria Editora, Rio de Janeiro, 1922), 3<sup>a</sup> ed., v. 1.
- [19] H. Rheinbolt, *A História da Balança, A Vida de J.J. Berzelius* (Nova Stella Editorial e Ed. da Universidade de São Paulo, 1968).
- [20] J. Tillreux, *Traité Élémentaire de Physique* (Cr. Berrenger, Paris, 1925).
- [21] B. Davis, *New Practical Physics* (The Macmillian Co., New York, 1929).
- [22] C.B. Boyer, *Journal of Physics* **10**, 176 (1942).
- [23] W. E. K. Middleton, *Isis* **54**, 11 (1963).
- [24] D.P.L Pires, J.C. Afonso e F.A.B. Chaves, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 101 (2006).
- [25] D.P.L. Pires, J.C. Afonso e F.A.B. Chaves, *Química Nova* **29**, 1393 (2006).
- [26] J.M. Oliveira Jr., N. André Filho, M.V. Chaud, M.M. Gonçalves, N. Aranha e J.R. Lima Jr., *Química Nova* **33**, 1385 (2010).
- [27] R. Ricetti, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **24**, 371 (2002).
- [28] C.G. Fraser, *The Story of Physics* (Reinhold Publishing Co., New York, 1948).