

Construção de um dilatômetro e determinação do coeficiente de dilatação térmica linear

(Building a dilatometer and determining the coefficient of linear thermal expansion)

Daniel Cosmo Pizetta¹, Valmor Roberto Mastelaro

Instituto de Física da São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil

Recebido em 17/5/2013; Aceito em 19/7/2013; Publicado em 26/2/2014

O estudo da dilatação térmica linear dos sólidos é de grande importância para diferentes áreas da física e engenharias como, por exemplo, a construção civil onde a dilatação pode causar danos estruturais irreversíveis. Por outro lado, dispositivos como sensores termostatos utilizados em equipamentos de aquecimento ou refrigeração, como ferros-de-passar e geladeiras, têm seu funcionamento baseado neste princípio físico. Os experimentos de ensino de física relacionados ao estudo da dilatação térmica de sólidos relatados na literatura utilizam diferentes tipos de aquecimento dos materiais estudados, mas a utilização de vapor d'água é a mais comum. Neste trabalho, está sendo proposta uma nova forma de aquecimento das amostras através de um forno elétrico que promove um aquecimento mais homogêneo, possibilitando resultados mais precisos, de forma mais rápida e de fácil visualização. O dispositivo foi construído com materiais de relativo baixo custo e de fácil aquisição. Os valores do coeficiente de dilatação térmica de diferentes materiais como alumínio, latão, cobre, cimento e vidro foram obtidos e mostraram um bom acordo quando comparados com os valores disponíveis na literatura.

Palavras-chave: dilatação térmica linear, laboratório de física.

The study of linear thermal expansion in solids is relevant in different fields of physics and engineering, as constructions, in which the thermal expansion may cause irreversible structural damages. Moreover, thermal expansion can be a physical principle for the construction of a thermal sensor device, which can be found in heating or cooling equipment, such as irons and refrigerators. Some methods to measure this phenomenon have been reported in the literature. Although they use different types of sample heating, the method of water vapor is the most used. In this paper we propose heating a sample by electrical heating which leads to more accurate data in a faster way. The device was built with materials of relatively low cost and easy acquisition. In comparison with the results found in the literature, the coefficients of thermal expansion for aluminum, brass, copper, cement and glass showed a good agreement with available data.

Keywords: linear thermal expansion, physics laboratory.

1. Introdução

1.1. Teoria

Quando a temperatura de um sólido varia, ocorrem mudanças de tamanho em todo seu volume que dependem da constituição do material. Este fenômeno é denominado dilatação térmica. Estudar este fenômeno é de grande importância para as áreas da física e engenharia, como a construção civil, pois, dependendo de sua magnitude, pode causar danos estruturais significativos e até irreversíveis [1–3]. Por outro lado, esta propriedade é o princípio físico na fabricação de sensores termostatos encontrados em equipamentos de aquecimento ou refrigeração como ferros-de-passar, cafeteiras, geladeiras, entre outros [1–5]. Neste trabalho limitare-

mos nosso estudo ao fenômeno de dilatação em apenas uma dimensão. A dilatação pode ser descrita, utilizando apenas os termos lineares da expansão em série de derivadas, pela Eq. (1), onde o comprimento final, L_f , depende dos fatores comprimento inicial, L_i , do coeficiente de dilatação, α , e da diferença de temperatura final e inicial, respectivamente T_f e T_i [4, 5]. Assim sendo, o coeficiente é o valor médio na faixa de temperatura estudada.

$$L_f = L_i[1 + \alpha(T_f - T_i)]. \quad (1)$$

A Eq. (1) pode ser reescrita como

$$\Delta L = L_i \alpha \Delta T, \quad (2)$$

onde $\Delta L = L_f - L_i$ e $\Delta T = T_f - T_i$. Nota-se, na

¹E-mail: daniel.pizetta@usp.br.

Eq. (2), que α é o coeficiente angular da curva gerada pelo gráfico da variação de comprimento dividido pelo comprimento inicial em função da variação de temperatura [3].

1.2. Metodologias de medida do coeficiente de dilatação térmica linear

Diferentes metodologias têm sido utilizadas em experimentos de ensino de física visando a determinação do coeficiente de dilatação térmica de diferentes materiais, em especial de sólidos. O mais utilizado nos laboratórios de ensino de física utiliza a passagem de vapor por dentro da amostra, na forma de um cilindro oco, para realizar o aquecimento. Este método apresenta temperaturas que se mantém dentro de certos limites se comparado a outros que utilizam chama, por exemplo, onde não há controle da temperatura. Entretanto, o número de pontos experimentais que podem ser coletados é limitado pois as medidas podem ser somente realizadas a temperatura ambiente e no ponto de ebulição da água, onde o sistema está em equilíbrio térmico ou onde a temperatura não varie significativamente rápida. Além disso, o tempo de espera para o aquecimento do sistema também é relativamente alto [6].

2. Materiais e métodos

O presente dispositivo para a análise do coeficiente de dilatação térmica linear consiste de um forno tubular no qual se insere uma amostra cilíndrica do material a ser estudado, sendo este o principal objetivo do trabalho, assim outras formas de medida de temperatura e deslocamento podem ser utilizadas. No presente caso a variação do comprimento da amostra, ou seja, sua dilatação, é medida a partir de um relógio comparador micrométrico e a temperatura é medida com um termômetro digital, ambos em contato com a amostra como pode ser observado na Fig. (1). Note que apesar do relógio estar em contato com a amostra, eles fazem um contato mínimo a fim de evitar a transferência de calor [7].

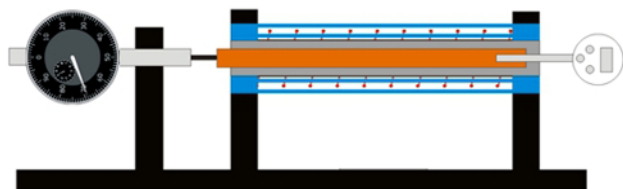


Figura 1 - Diagrama esquemático do dilatômetro. Da esquerda para a direita: relógio comparador, dilatômetro e termômetro.

O forno é constituído de um tubo de alumínio de cerca de 10 mm de diâmetro coberto com camadas de filme de poliéster servindo como isolante elétrico entre as camadas do elemento aquecedor [8].

O filme de poliéster é um bom isolante elétrico, resistente a temperaturas de cerca de 200 °C e bom condutor térmico. Este filme é o mesmo utilizado em culinária e tem um custo baixo. Ensaios realizados com o filme de poliéster submetido a várias temperaturas constataram que o mesmo sofre degradação em temperaturas acima de 190 °C, assim como informado pelo fabricante. Dentro da faixa utilizada para o experimento a temperatura não ultrapassa os 100 °C.

O elemento aquecedor é um fio Kanthal n° 35 com resistência total da ordem de 1500 Ω que proporciona aproximadamente 30 W de potência considerando tensão de rede de 220 V. Essa potência é suficiente para o aquecimento das amostras em aproximadamente 10 minutos com uma variação de temperatura entre 25 °C a 85 °C. O fio Kanthal pode ser adquirido em rolos ou por metro, em lojas ou fornecedores de elementos de aquecimento. No equipamento descrito foram utilizados 20 m de fio de diâmetro 0,16 mm.

Foram utilizadas três camadas de fio *Kanthal* sobre as camadas de filme de poliéster, sendo a última envolvida com o filme de poliéster para proporcionar maior segurança ao utilizador em relação a possíveis choques elétricos. A utilização destes elementos visa também o resfriamento rápido do forno, possibilitando a análise de várias amostras em um tempo relativamente curto.

As duas extremidades do forno não devem ser fixadas, pois a dilatação do forno pode interferir nas medidas. A base do experimento também deve ser mantida distante do forno de forma que ele não a aqueça, evitando assim interferência nas medidas. Pode-se também inserir um isolante térmico entre o forno e seu apoio na base para que não haja transferência de calor para a base, que em nosso caso foi utilizado Celeron. Alguns detalhes do aparelho podem ser vistos na Fig. 2.

Em uma das extremidades o relógio comparador é fixado na base e colocado em contato com a amostra a ser medida, com o mínimo contato possível de forma a não ocorrer passagem de calor para o relógio. Isto pode ser feito através de uma ponta fina na extremidade do relógio comparador. O relógio comparador utilizado possui a graduação de 0,01 mm com precisão de $\pm 0,013$ mm. Atualmente pode-se encontrar com facilidade o relógio em lojas de equipamentos industriais. Este modo de aferição foi utilizado, pois havia a nossa disposição relógios comparadores que estavam sem uso. Outros modelos de aferição podem ser adotados como, por exemplo, o modelo de aferição angular, onde o giro de um pequeno cilindro posto embaixo de uma extremidade da barra mede seu deslocamento. Mais informações sobre este método podem ser encontrados na Ref. [9].

Na outra extremidade um parafuso faz a fixação da amostra ao forno, que também está em contato com o forno, garantindo que não há gradientes de temperatura que possam influenciar as medidas. Um orifício de cerca de 3 cm de profundidade na amostra permite a

medida da temperatura por um termômetro digital ou termopar. No caso exposto o termômetro utilizado possui uma escala de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, graduação de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e precisão de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porém, nos resultados apresentados foi considerado $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o erro na temperatura dada por sua estabilização. Tais erros foram transferidos para o eixo da dilatação, com base na Ref. [11].

O uso de um controlador para a temperatura é es-

sencial para gerar a rampa de temperatura e garantir a estabilidade em cada ponto. Para tal propósito foi utilizado um *dimmer* comercial que faz o controle da tensão, permitindo assim o controle da temperatura. O tempo de espera entre cada ponto coletado pode ser estimado observando-se a estabilização da temperatura pelo termômetro ou termopar.

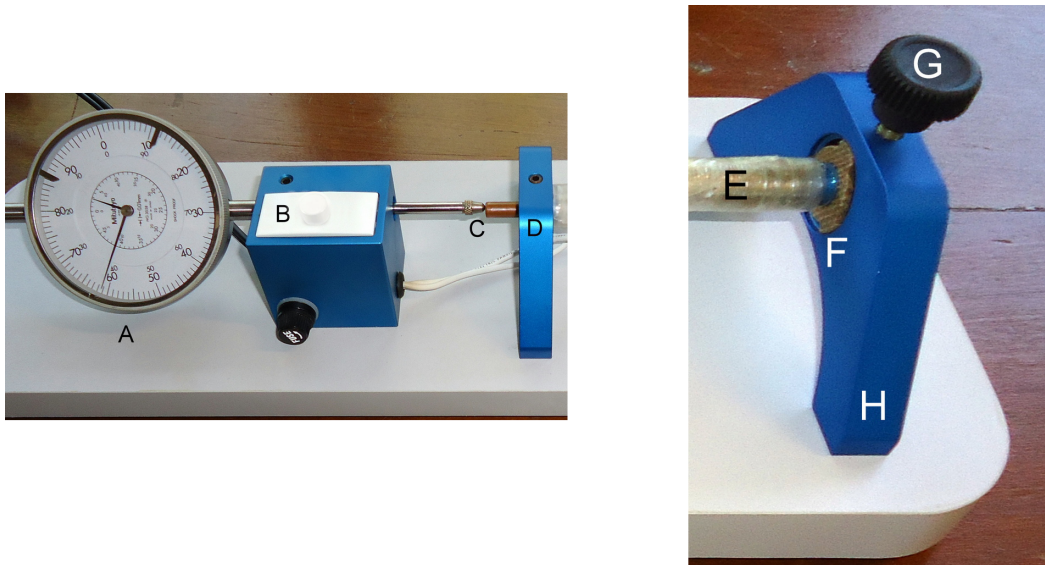


Figura 2 - Detalhes do dilatômetro: A - relógio comparador; B - base para *dimmer*, fúsivel e fixação do relógio comparador; C - ponta de contato do relógio com a barra analisada; D - base com extremidade livre do forno; E - forno; F - isolador de aquecimento; G - parafuso de fixação da barra analisada; H - base com extremidade fixa do forno.

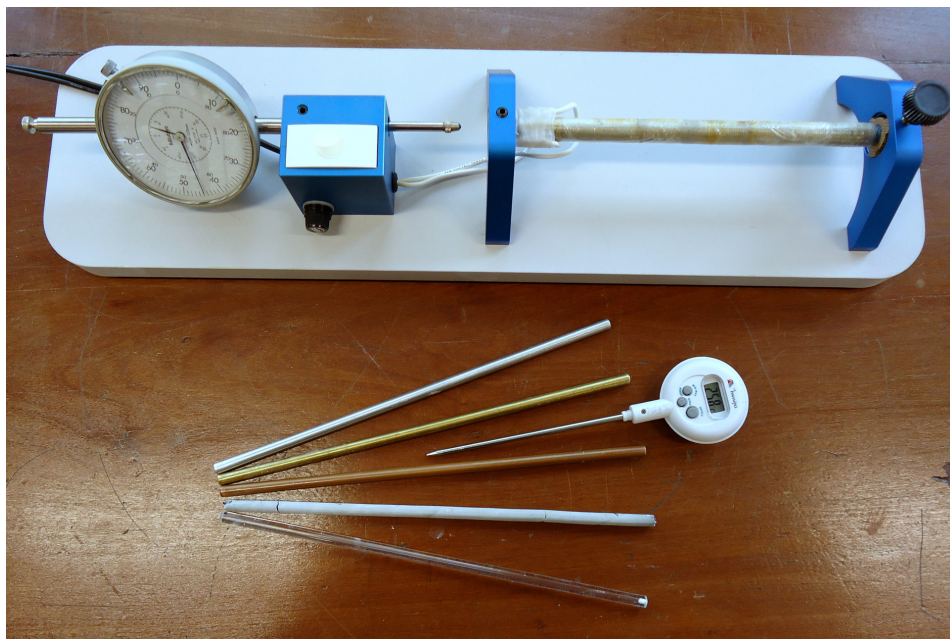


Figura 3 - Montagem final do dilatômetro juntamente com o termômetro e as amostras de alumínio, latão, cobre, cimento e vidro (de cima para baixo).

Foram utilizadas cinco amostras diferentes sendo estes: alumínio, latão, cobre, cimento e vidro. Todas as amostras possuíam (230 ± 1) mm de comprimento e (6 ± 1) mm de diâmetro. A Fig. (3) apresenta a montagem final do dispositivo utilizado.

Todas as medidas foram realizadas após o equilíbrio térmico tanto do forno quanto da amostra. A temperatura variou de 25°C a 75°C e os dados experimentais foram adquiridos a cada $1\ \mu\text{m}$ de dilatação.

3. Resultados

O tempo de aquisição dos dados de cada amostra foi em média de 10 minutos com variação de mais ou menos 3 minutos. A grande variação é devida a sua dependência com a condutividade térmica do material estudado. O tempo para o resfriamento do forno à temperatura ambiente foi de aproximadamente 5 minutos.

Com os dados adquiridos foi construído o gráfico da Fig. (4). Para todas as amostras citadas anteriormente, observou-se um comportamento linear da dilatação térmica dentro da faixa de temperatura utilizada. Observa-se também que os dados para o vidro e o cimento não atingem a temperatura limite de cerca de 75°C . Isso ocorre pelo fato destes materiais não serem bons condutores térmicos como os metais e a potência que o aparelho fornece não é suficiente para aquecê-los [2, 3, 5].

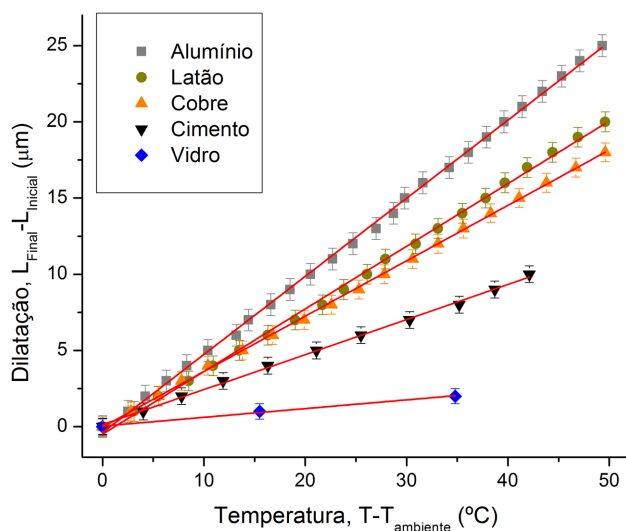


Figura 4 - Dados experimentais da variação de comprimento dividido pelo comprimento inicial em função da diferença de temperatura com relação a temperatura ambiente. A linha contínua representa o ajuste linear dos dados experimentais.

Utilizando o programa Origin - *OriginLab Corporation*, foi realizado o ajuste linear dos dados experimentais observados na Fig. (4) utilizando o método dos mínimos quadrados. A partir deste procedimento e utilizando a Eq. (2) foram calculados os coeficientes de dilatação térmica linear das amostras e os valores foram apresentados na Tabela 1 juntamente com os dados

reportados na literatura [1, 5, 10, 11].

Tabela 1 - Coeficientes de dilatação térmica linear de diferentes amostras analisadas e comparados com os valores da literatura.

| Material | Coeficiente de dilatação linear, $10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$ | |
|----------|---|----------|
| | Experimental | Tabelado |
| Alumínio | $22,3 \pm 0,1$ | 22 – 25 |
| Latão | $17,9 \pm 0,2$ | 18 – 19 |
| Cobre | $15,9 \pm 0,1$ | 16 – 17 |
| Cimento | $10,0 \pm 0,1$ | 10 – 14 |
| Vidro* | $2,5 \pm 0,2$ | 1 – 3 |

*Vidro borossilicato - *Pirex*.

Conforme observado na Tabela 1, a comparação entre os valores do coeficiente de expansão térmica linear de todas as amostras, podem ser consideradas muito boas dentro do objetivo proposto. Os valores apresentados na tabela contemplam valores de máximos e mínimos encontrados nas referências, pois variam dependendo da composição do material [1].

Em relação à amostra vítrea, apesar de ter sido possível realizar a medida da dilatação térmica, a variação do comprimento com a temperatura é muito pequena, uma vez que as amostras vítreas apresentam coeficientes de dilatação térmica pequenos se comparados com os metais analisados, assim como o cimento. Por exemplo, além do vidro borossilicato utilizado podemos citar o vidro comum que possui o coeficiente de expansão térmica linear igual a $8,6 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$. Desta forma, o vidro apresenta uma ordem de grandeza menor que as demais amostras analisadas [5].

4. Conclusão

Os materiais utilizados na confecção do dispositivo de medida da dilatação térmica - dilatômetro, em especial o forno, são de fácil aquisição e baixo custo. A montagem proporciona também flexibilidade para o uso de outros métodos de aferição como, por exemplo, o angular, sem a perda de eficiência.

No que se refere a estabilidade da temperatura, o formato do forno, que envolve a amostra, garante a minimização dos fatores externos, como a possível variação da temperatura devido a passagem de correntes de ar.

Quanto ao tempo de medida, a possibilidade da coleta de um número significativo de dados experimentais a medida que a temperatura é variada torna possível observar mais facilmente e em detalhes a variação de comprimento das amostras analisadas. Se for utilizada uma maior potência de aquecimento juntamente com um controlador do tipo *dimmer*, o dispositivo pode ser utilizado em demonstrações onde ocorre uma variação rápida do comprimento.

O dispositivo proposto também proporciona um aquecimento e resfriamento rápido do forno permitindo assim, a realização de uma quantidade significativa de medidas em um curto intervalo de tempo.

Os valores dos coeficientes de dilatação térmica linear das amostras analisadas foram consistentes com os valores da literatura evidenciando a qualidade do dispositivo proposto.

Finalmente, comparando com os métodos citados anteriormente, a forma de aquecimento do dispositivo proposta neste trabalho pode ser aplicada a qualquer tipo de amostra que possa ser confeccionada na forma de um cilindro ou mesmo em barra maciça, sem necessidade de serem vazados ou fazer contato direto com vapor d'água, o que poderia fragilizar e até destruir a amostra.

Os resultados obtidos mostram claramente as vantagens da utilização do dispositivo em aulas de ensino de física envolvendo o conceito de dilatação térmica linear, como a obtenção de resultados mais confiáveis, de fácil visualização e em um curto intervalo de tempo.

5. Agradecimentos

Ao empenho e dedicação dos técnicos Antenor Fabbri Petrilli Filho, Carlos Alberto Arruda Camargo, Cláudio Boense Bretas e Jae Antonio de Castro Filho. Ao professor Eduardo Ribeiro Azevedo pela ajuda na confecção e testes com o equipamento. Às revisões realizadas por Geisiane Rosa da Silva e José Ricardo Furlan Ronqui. Ao Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo por ter propiciado o desenvolvimento do equipamento que atualmente está em uso nos Laboratórios de Ensino de Física e a Pró-reitora de Graduação que por meio do programa Ensinar com Pesquisa propiciou o início deste projeto.

Referências

- [1] Robert Resnik, David Halliday and Kenneth S. Krane, *Física: Fundamentos e Aplicações* (LTC - Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, 2003), 5^a ed., v. 1. p. 212-215.
- [2] Hugh D. Young and Roger A. Freedman, *Física II: Termodinâmica e Ondas* (Pearson Addison Wesley, São Paulo, 2008), 12^a ed., p. 108-112.
- [3] Jerry B. Marion, *Physics in the Modern World* (Academic Press Inc., New York, 1981), 2nd ed., p. 211-220.
- [4] Francis Weston Sears, *Fundamentos de Física I: Mecânica, Calor y Sonido* (Aguilar, Madrid, 1960), 3^a ed.
- [5] Michael Ference Jr, Harvey B. Lemon and Reginald J. Stephenson, *Curso de Física: Calor* (Edgar Blücher Ltda, São Paulo, s.d.), p. 8-15.
- [6] Tito José Bonagamba, *Laboratório de Ensino: Práticas* (IFSC-USP, São Carlos, 2008), 53 p.
- [7] Daniel Cosmo Pizetta, Antenor Fabri Petrilli Filho, Cláudio Boense Bretas, Jae Antônio Castro Filho, In: *Resumos 17^o Simpósio Internacional de Iniciação Científica*, 2009, São Carlos, p. 2735.
- [8] A.B. Kanthal, *Kanthal[®] Handbook Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnances* (PRIMA-trick, Hallstahammar, 2003).
- [9] Wilson Lopes, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, **28**, 423 (2011).
- [10] Lawrence S. Lerner, *Física: Fundamentos e Aplicações*, v. 2 (McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1982), p. 389-390.
- [11] José Henrique Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros* (Edgard Blucher, São Paulo, 1996), 2^a ed. cap. 8.6.