

Nova metodologia para aferição da temperatura final de hastes metálicas em um experimento de dilatação térmica linear

(New methodology to measure the final temperature of metal rods in an experiment of linear thermal expansion)

Bruno Gonçalves¹, Mário M. Dias Júnior, Weverton C. Batalha,
Gabriel S. Nascimento, Felipe S. Monteiro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais, Juiz de Fora, MG, Brasil

Recebido em 30/9/2011; Aceito em 2/2/2013; Publicado em 24/4/2013

Para realizar o estudo da expansão térmica em diversos materiais é necessário conhecer o seu coeficiente de dilatação linear, mas em alguns casos é difícil medir a temperatura final do corpo em estudo. Descrevemos uma atividade experimental de baixo custo com o objetivo de mostrar uma metodologia de medição e ensino que resolva o problema da aferição desta temperatura final. A metodologia desenvolvida utiliza materiais de fácil acesso e o resultado encontrado, bastante satisfatório, é descrito ao longo deste trabalho. O valor do coeficiente de dilatação medido experimentalmente para o cobre foi igual a $(1,70 \pm 0,32) \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Palavras-chave: expansão térmica, coeficiente de dilatação térmica, materiais de baixo custo.

For the study of thermal expansion in various materials it is necessary to know the coefficient of linear expansion, but in some cases it is difficult to measure the final temperature of the sample under consideration. We present a low-cost experimental setup in order to show a teaching methodology to address the problem of measuring this final temperature. The methodology uses materials that are easy to find, and the positive result are described in this paper. The value of the experimentally measured thermal expansion coefficient for copper was $(1.70 \pm 0.32) \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Keywords: thermal expansion, thermal expansion coefficient, low-cost materials.

1. Introdução

Os efeitos da dilatação térmica dos materiais despertam nas pessoas o interesse pelo tema, por estarem relacionados a fenômenos com os quais elas convivem diariamente.

As propriedades térmicas dos materiais são aquelas compreendidas pela resposta ou reação do material à aplicação de calor. São consideradas como propriedades térmicas: a condutividade térmica, a expansão ou dilatação térmica, a capacidade calorífica, dentre outras [1].

Cada material reage de forma diferente a uma variação de temperatura. A maioria dos materiais expande quando aquecidos, através de uma escala de temperatura que não produz fusão ou ebulição. Em um modelo simples, o aumento da temperatura provoca um aumento da amplitude de vibração dos átomos no material, o que aumenta a distância média entre eles, resultando na expansão do material em questão [2]. Geralmente, há o aumento da densidade de líquidos e sólidos, quando aquecidos. No entanto, existem substâncias que

em determinados intervalos de temperatura, sofrem o fenômeno inverso, ou seja, diminuem de volume quando a temperatura aumenta. Isto ocorre em virtude do rearranjo da estrutura cristalina do material, como acontece com a água, correspondendo a uma dilatação térmica anômala.

A água se contrai quando a temperatura aumenta na faixa de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ e só começa a se dilatar quando a temperatura ultrapassa essa faixa. A dilatação irregular da água possui consequências importantes para o meio ambiente. Ela impede que rios, lagos e mares de regiões frias se congelem por completo, convertendo-se em blocos integralmente sólidos. À medida que a água se solidifica, forma-se uma camada de gelo na superfície, mas por baixo dessa camada sólida a água permanece no estado líquido, com temperatura em torno de $4 \text{ }^\circ\text{C}$, permitindo que organismos e espécies aquáticas nativas desses habitats possam sobreviver. Além disso, tal fenômeno controla a magnitude das calotas polares, as quais seriam muito mais extensas na ausência dessa anomalia.

Podemos ressaltar outros elementos que também se

¹E-mail: bruno.goncalves@ifesudestemg.edu.br.

coportam como a água quando submetidos ao aquecimento, durante o processo de dilatação, dentre eles o gálio, o germânio, o bismuto e o antimônio [3, 4].

O objetivo deste artigo é apresentar uma alternativa para a correta aferição da temperatura final e determinação do coeficiente de dilatação linear de diversos materiais, a partir da utilização de materiais de baixo custo associados a um equipamento de uso comum em laboratórios didáticos para ensino de física.

Na instituição de ensino em que esse trabalho foi desenvolvido, foi verificada a necessidade do desenvolvimento de uma nova abordagem na realização do experimento de dilatação térmica do cobre a partir do equipamento que havia no laboratório de física [5]. Tal diagnóstico surgiu da observação que a partir do equipamento disponível, não era possível obter o valor esperado para a temperatura final do material estudado, visto que ele apresentava diferentes temperaturas ao longo de seu corpo. A dificuldade na obtenção deste resultado foi o que motivou o começo do estudo deste trabalho, pois essa discrepância entre as temperaturas ao longo da haste metálica não parecia respeitar a lei de propagação de calor. Observou-se que havia uma diferença considerável entre as temperaturas medidas após o sistema entrar em equilíbrio térmico. Então, foram tomados três pontos diferentes como referência ao longo da haste, um no início, outro no meio e um último no final. Para realizar as aferições seguindo as orientações do equipamento, foram utilizados os termômetros infravermelho, químico e termopar, de tal forma que para cada instrumento de medida utilizado foi encontrado um valor diferente para a temperatura dos pontos marcados. Fazendo uso do termômetro infravermelho, foi obtido o valor de $(044 \pm 002)^\circ\text{C}$ para o início, $(033 \pm 004)^\circ\text{C}$ para o meio e $(038 \pm 002)^\circ\text{C}$ para o final da haste. Empregando o termômetro convencional (químico), foram anotados os valores de $(49,7 \pm 2,0)^\circ\text{C}$, $(43,4 \pm 1,5)^\circ\text{C}$ e $(47,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ respectivamente para o início, meio e final. Já com o termopar, foram registrados os valores de $(084 \pm 001)^\circ\text{C}$, $(080 \pm 001)^\circ\text{C}$ e $(083 \pm 001)^\circ\text{C}$, relativos ao início, ao meio e o final do corpo metálico. Notou-se que a haste possuía uma temperatura elevada tanto no início quanto no final e baixa no meio. Desta forma, não é possível falar em temperatura da haste já que cada ponto apresenta um valor, mesmo depois de o sistema experimental entrar em equilíbrio térmico com o meio.

Em suma, com o aparato experimental utilizado na instituição é possível medir com precisão todas as grandezas físicas envolvidas neste fenômeno tais como a temperatura inicial, os comprimentos inicial e final do corpo, exceto a temperatura final do objeto.

Nossa proposta consiste no desenvolvimento de um método que tende a diminuir o erro provocado na medição da temperatura final em equipamentos comumente utilizados nos laboratórios das instituições de ensino, gerando assim maior confiabilidade na obtenção

do coeficiente dos materiais em estudo.

Na próxima seção, apontaremos os problemas encontrados no laboratório estudado. Nas seções 3 e 4, abordaremos a metodologia científica utilizada e discutiremos o seu desenvolvimento. Já na seção 5, mostraremos os resultados obtidos e por fim, escreveremos nossas conclusões.

2. Problemas encontrados

Durante a realização de um experimento no laboratório de física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora (IF Sudeste MG – JF) foi encontrado um problema científico de física básica. Esta experiência é ensinada nos cursos de graduação (Física e Engenharia Mecatrônica) e Ensino Médio, e possui uma metodologia científica incompatível com o fenômeno físico que se deseja abordar.

O experimento disponibilizado é um Conjunto para Dilatação (Fig. 1), conhecido como Dilatômetro, produzido pelo Centro Industrial de Equipamentos de Ensino e Pesquisa (Cidepe), modelo EQ239A, que contém os respectivos componentes: gerador de vapor elétrico (Fig. 1 – item 1), reservatório para água (Fig. 1 – item 2), base de sustentação metálica com hastes fixas para sustentação do corpo de prova (Fig. 1 – item 3), relógio comparador (Fig. 1 – item 4), corpos de prova (exemplo, latão, cobre e aço) (Fig. 1 – item 5), conexões de entrada e saída de água (Fig. 1 – itens 6 e 7), termômetros químicos (Fig. 2), termômetros químico e infravermelho (Fig. 2) e medidores digitais (multímetros) (Fig. 3).

Durante a realização do experimento, buscou-se seguir os passos descritos no manual do fabricante do equipamento, para que chegássemos aos resultados esperados. Para tanto, uma das grandezas físicas que precisa ser aferida com precisão é a temperatura final da haste metálica. Com este objetivo, foram utilizados variados tipos de termômetros como o químico, o infravermelho, o termopar e/ou o infravermelho à prova d'água, com diferentes princípios de aferição de temperatura, os quais indicaram que a temperatura da haste metálica ao longo de vários pontos não era igual, após o equilíbrio térmico do sistema. A divergência existente entre as temperaturas medidas era notável, de tal forma que o calor era elevado tanto no início quanto no final e baixo no meio.

Tal fato nos motivou a pensar no desenvolvimento de um método confiável de se medir corretamente a temperatura final da haste, que pudesse ser utilizado com os equipamentos que dispúnhamos no laboratório para que pudesse ser utilizado por outros professores e em outras instituições futuramente. E, a partir da conclusão que seria necessário adicionar outros materiais ao experimento, optou-se por itens de baixo custo a fim de que tal metodologia pudesse ser empregada,

sem grandes dificuldades nas disciplinas das quais esta experiência faz parte da ementa.

Assim, como instrumentos complementares foram

utilizados: uma caixa térmica de isopor de 100 litros com furos laterais; fita isolante; espuma de isolamento térmico para canos; e sacos de gelo comum moído.

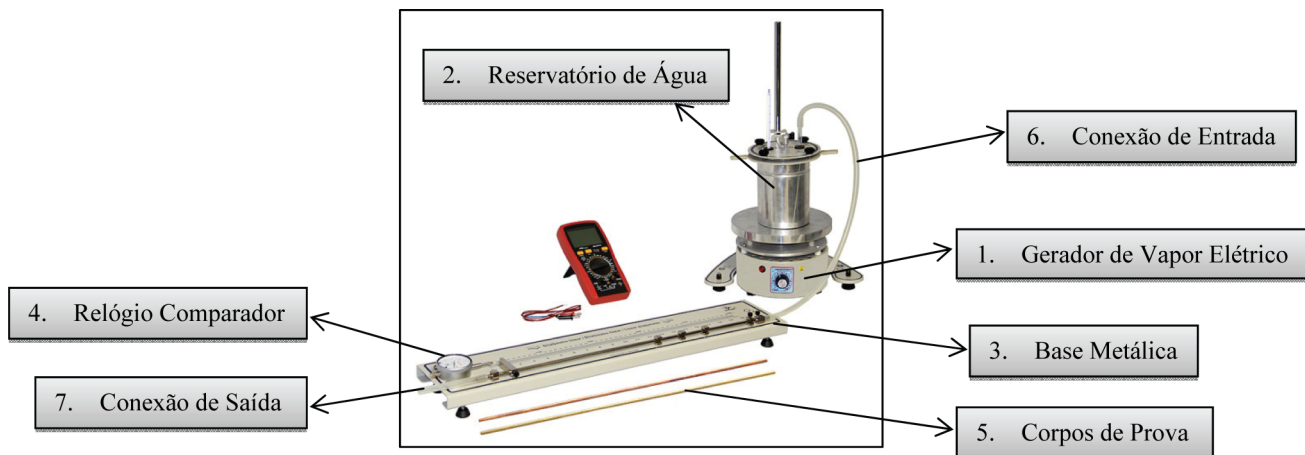


Figura 1 - Conjunto de dilatação.



Figura 2 - Termômetros químico e infravermelho, respectivamente.



Figura 3 - Medidor digital (multímetro).

Nas duas próximas seções, iremos discutir o método que empregamos para se obter a temperatura final da haste metálica de cobre. A escolha deste material foi aleatória, considerando que para a nossa finalidade não faria diferença em utilizar os outros tipos de hastes

como a de latão ou a de aço. O coeficiente de dilatação do cobre é conhecido na literatura [2, 6]. E o foco do trabalho está na discussão da nova metodologia que foi desenvolvida, utilizando qualquer uma das hastes como “corpo de prova”.

3. Procedimento experimental inovador

Para a resolução do problema encontrado no Laboratório de Física do IF Sudeste MG - JF foram necessárias poucas horas de trabalho de bancada e grande tempo dedicado a discussões sobre conceitos físicos envolvidos, em métodos de aferições de temperatura.

O objeto da nossa pesquisa foi analisar e aperfeiçoar o método comumente utilizado, a fim de se medir corretamente a temperatura final de hastes metálicas no experimento de dilatação térmica e calcular o valor do coeficiente de dilatação de materiais como o cobre, o latão e o alumínio.

O levantamento bibliográfico realizado trouxe à tona várias análises e discussões já realizadas em relação a esse método [7-11], a partir das quais se buscou opções para o aperfeiçoamento da metodologia utilizada objetivando agregar valor e credibilidade à experiência. As ideias desenvolvidas serão demonstradas e explicadas de forma detalhada nos próximos parágrafos.

O método consiste inicialmente em posicionar a haste metálica (Fig. 4 – item 1) em uma base principal metálica. Logo após, empurra-se a haste para um lado do suporte do relógio comparador (Fig. 4 – item 2), também chamado de medidor de dilatação, ajustando o batente móvel (Fig. 4 – item 3), e direcionando o para-

fuso (Fig. 4 – item 4) contra o pino até que a haste não possa ser movida, utilizando esse como o ponto de referência. Esta operação, por mais cuidado que se tome, acarretará um pequeno deslocamento do ponteiro maior do relógio, garantindo que o extremo da haste metálica, está realmente tocando a ponta do indicador.

Para encontrar o comprimento da haste à temperatura ambiente, faz-se a medição a partir do ponto de fixação da haste até o ponto onde é colocada a extremidade de contato do relógio comparador (Fig. 4). Essa medição deve ser feita durante a montagem do equipamento, a fim de reduzir consideravelmente o risco de erro. Em seguida, anotam-se os resultados encontrados e mede-se o comprimento da haste antes da fixação do termopar, o que facilita a medição do tamanho da haste.

Após realizar a montagem do termopar (Fig. 5 – item 1), deve-se fixá-lo no meio da haste, alinhando-se o terminal com o eixo do tubo, para que haja maior contato entre esses componentes. A seguir, conectam-se os pinos do termopar na entrada do multímetro

chamada “K-TYPE THERMOCOUPLE” observando a marcação correta da polaridade (Fig. 5 – item 2), e posiciona-se a chave seletora do aparelho na função para medir temperatura (Fig. 5 – item 3).

Antes de medir a temperatura, contudo, deve-se revestir o termopar com uma espuma de isolamento térmico para canos (Fig. 6 – item 1), tomando-se o cuidado de fixar o termopar na haste com fita isolante, antes do isolamento (Fig. 6 – item 2).

A colocação da espuma antes de medir e registrar os valores do termopar é de suma importância, reduzindo interferências e erros. Em sequência, mede-se e registra-se o valor da temperatura ambiente utilizando o termopar do multímetro e este valor é anotado para utilização posterior. Outro furo foi realizado na espuma a fim de se acomodar o termômetro infravermelho à prova d'água, ficando este em contato direto com a barra (Fig. 7 – item 1). Buscando um melhor aproveitamento do tempo e o equilíbrio térmico entre a barra e a espuma, realiza-se esse procedimento antes de colocar todo o equipamento na caixa térmica de isopor.



Figura 4 - Conjunto de dilatação do laboratório.

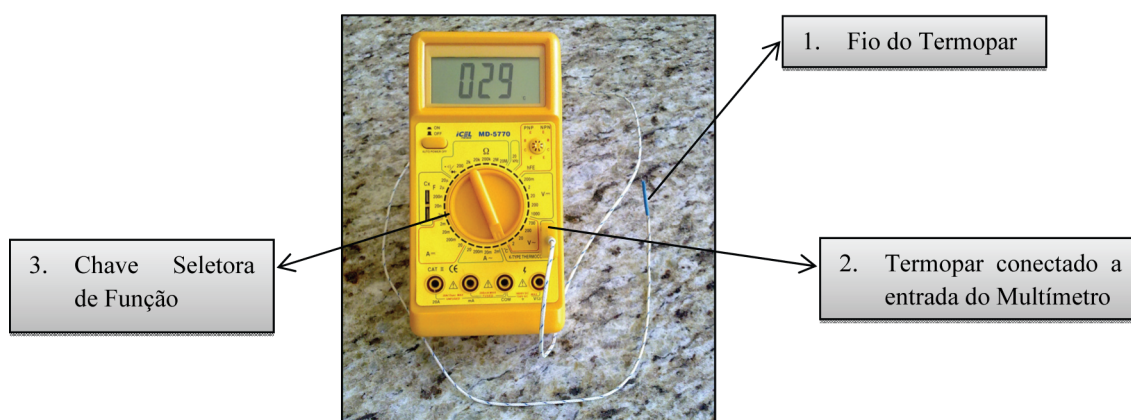


Figura 5 - Multímetro com o termopar.

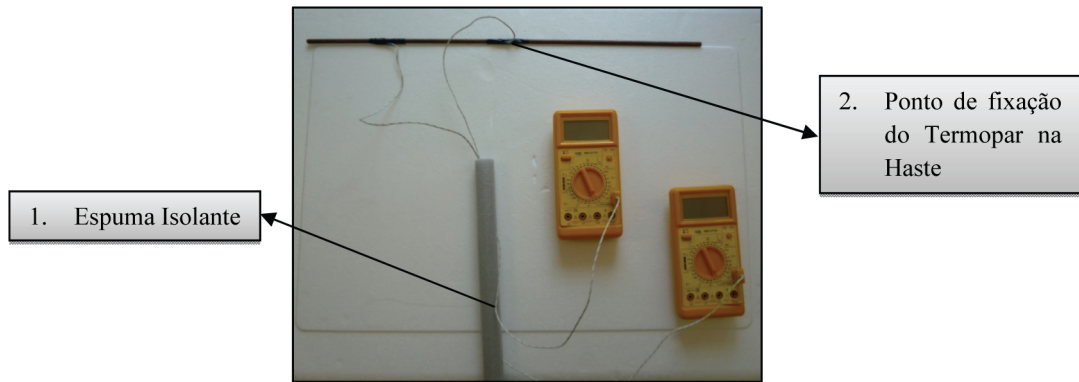


Figura 6 - Fixação dos termopares.

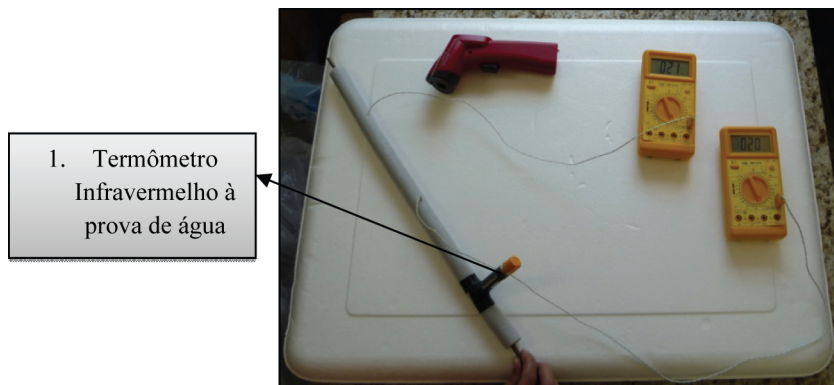


Figura 7 - Fixação do termômetro infravermelho.

Instala-se o equipamento montado, ou seja, a base principal metálica juntamente com a haste no fundo da caixa térmica de isopor de 100 litros. Utiliza-se esta caixa, pois o seu comprimento é maior que o do equipamento montado, facilitando o manuseio, condicionamento e execução do experimento. O aparato deve ser posicionado na caixa antes de efetuar as conexões de entrada e saída do vapor de água a fim de facilitar todo o procedimento experimental. Com a primeira estrutura pronta (Fig. 8 – item 1), outra foi montada de maneira bem simples, sem nenhum instrumento de

medição, apenas com o conjunto de dilatação descrito no manual do fabricante (Fig. 8 – item 2). Esta segunda montagem foi feita para efeito de comparação ao final do experimento, podendo-se verificar se as duas hastes dilataram na mesma proporção. Ela também foi alocada dentro da mesma caixa de isopor que continha a primeira estrutura montada (Fig. 8).

Então, os sacos de gelo moído são colocados sobre todo o aparato montado até envolvê-lo completamente, possibilitando assim, uma condição melhor de trabalho para o dilatômetro (Fig. 9).

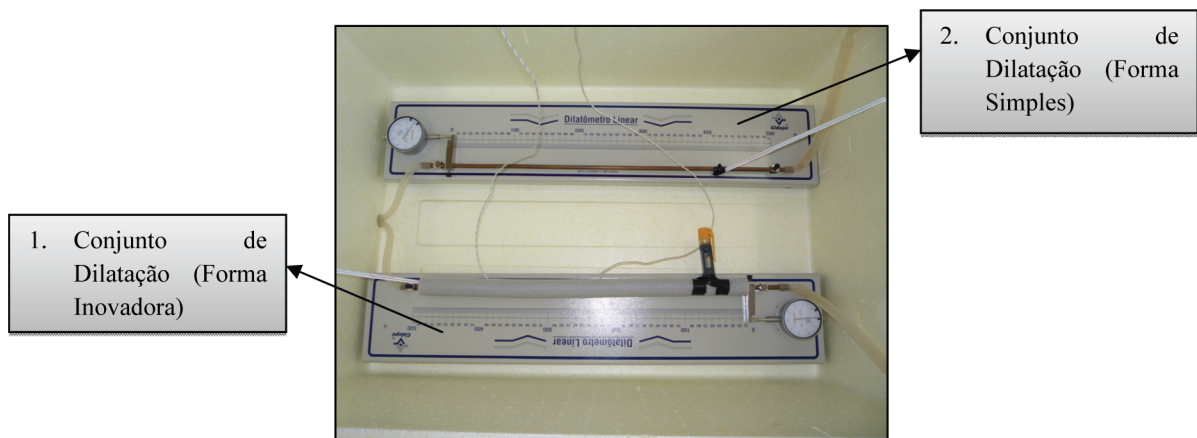


Figura 8 - Montagem e armazenamento dos equipamentos.

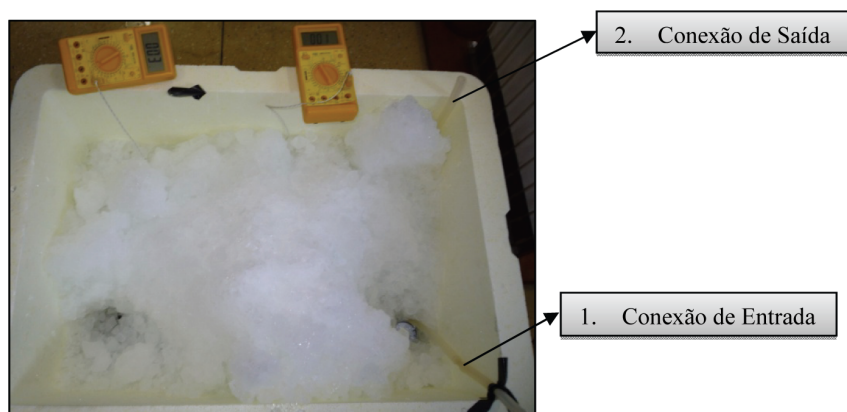


Figura 9 - Sistema experimental final com o gelo.

A conexão de entrada é usada para conectar o gerador de vapor a extremidade inicial da haste (Fig. 9 – item 1), e a conexão rápida de saída é anexada ao final do corpo metálico em estudo (Fig. 9 – item 2). Deve-se colocar um recipiente na extremidade final da conexão de saída para coletar a água de drenagem do experimento.

Depois, ajustam-se os detalhes referentes ao posicionamento do gelo para que este não influencie durante a calibração do relógio comparador, evitando-se efetuar medições errôneas. Como a haste metálica se expande, o ponteiro indicador se moverá em sentido anti-horário. Antes de começar a experiência, acerta-se o “zero” da escala maior do relógio comparador girando o anel recartilhado do relógio para que este não efetue medidas incorretas.

Por último, antes de ligar o gerador de vapor (Fig. 10 – item 1), o reservatório de água é preenchido (Fig. 10 – item 2), verificando se a quantidade é suficiente para todo o tempo de duração da experiência. Então, introduz-se um termômetro de mercúrio em uma entrada específica na tampa para a medição da temperatura da água contida no recipiente (Fig. 10 – item 3). Em seguida, verifica-se se a válvula de segurança está fechada (Fig. 10 – item 4), e então o gerador de

vapor é ligado. Assim, a parte superior do reservatório não deve ser removida (Fig. 10 – item 5). À medida que o vapor flui deve-se observar o relógio comparador e o multímetro. Quando o termopar estabilizar, faz-se o registro dos valores da temperatura. Também deve ser registrada a expansão do comprimento da haste indicada pelo deslocamento do ponteiro do relógio.

Com a execução desse procedimento, finaliza-se a experiência para a haste escolhida. Com os dados coletados durante o experimento, é possível avaliar se as alterações surtiram efeito e tornaram mais precisa a obtenção do coeficiente de dilatação linear através do dilatômetro.

4. Análise da metodologia desenvolvida

Com a finalidade de solucionar o problema já exposto: medir corretamente a temperatura de hastes metálicas como as de cobre, latão ou alumínio e, após um estudo a respeito deste tema, acreditamos ter dado um aspecto mais prático ao experimento, no entanto, sem fugir ao rigor científico ou efetuar medições incorretas que fossem incompatíveis com princípios físicos pré-estabelecidos [12].



Figura 10 - Gerador de vapor e reservatório de água.

Nesse período de discussões, no qual foi tomada a decisão de quais materiais iriam ser integrados ao experimento e qual seria a melhor forma de empregá-los, buscou-se trazer conhecimentos práticos e simples de objetos que são empregados no dia-a-dia, e que tivessem princípios coincidentes com a situação proposta, como a busca por uma forma de isolar a barra de metal e homogeneizar o máximo possível toda a haste [9, 13] e o ambiente onde ela se encontrava. Era nosso objetivo, desenvolver um modelo financeiramente viável, bem elaborado, prático e simples, tomando o cuidado para que a estrutura apresentasse o mínimo de riscos para o operador, evitando, por exemplo, o contato direto com estruturas excessivamente quentes, visando à segurança de todos os envolvidos no experimento.

Portanto, foram escolhidos materiais simples e de baixo custo, indispensáveis à realização do experimento, além de todo o aparato presente no laboratório. Os materiais serviram para complementar a experiência fazendo com que ela se realizasse de forma correta e que se pudesse fazer o teste das teorias baseadas nos estudos contínuos dos alunos, seguindo as orientações do professor. Além de conquistar o objetivo do trabalho com simplicidade, acessibilidade e objetividade, ou seja, com foco na resolução do problema.

O aparato presente no laboratório, citado anteriormente, permite a medida da temperatura inicial e, do comprimento inicial e final da haste metálica, impossibilitando, no entanto, a medição da temperatura final, a qual é indispensável para o cálculo do coeficiente de dilatação para estes metais, que são supostos isotrópicos.

Para a realização da experiência no laboratório, estando todos os presentes munidos de conhecimentos básicos sobre o tema, bem como os relacionados com os padrões de medidas e os erros inerentes a elas, a estrutura foi montada. A haste de cobre foi fixada normalmente na base e presa corretamente com o parafuso e no batente móvel. A escolha do material da qual a haste é constituída foi aleatória, como foi explanado no final da segunda seção deste artigo, considerando que não haveria diferença se o material fosse outro. Os tubos de entrada e saída do vapor de água foram conectados às extremidades da barra. Para este experimento, utilizamos somente dois tipos de termômetro, o baseado no princípio do termopar, com o auxílio de dois multímetros e dois fios, e um termômetro infravermelho à prova d'água. Todos os instrumentos de medição foram submetidos a um processo de calibração antes de dar início ao experimento, para verificar se as leituras guardavam homogeneidade entre si e também em relação aos outros tipos de termômetros como o químico e o infravermelho, sendo o último um aparelho que realiza medidas de temperatura à distância captando radiações térmicas. Foram realizados testes com diferentes objetos e em diversas situações, sendo que os termômetros utilizados no experimento descrito neste trabalho foram aqueles que apresentaram resulta-

dos condizentes entre si. Já os instrumentos que apresentaram medidas discrepantes foram eliminados.

A espuma isolante para canos foi colocada na haste, envolvendo-a completamente, pois, uma vez que o equilíbrio térmico fosse atingido, o calor seria uniforme ao longo do comprimento da haste. E deste modo, todas as aferições poderiam ser feitas de forma correta e com confiança. O isolador teve a função de inibir a perda de calor através da junção do termopar, para que a temperatura da junção ficasse muito próxima da temperatura da haste. Os dois termopares, então, foram fixados em locais distintos da barra, o primeiro em uma extremidade e o segundo no meio, passando os fios dos aparelhos através de pequenos furos feitos na borracha isolante, assegurando que somente a ponta de cada fio iria entrar em contato com a haste. Dessa forma evita-se o risco de contato do restante do fio com a haste, trazendo alterações nas medições (Fig. 6). Já o termômetro infravermelho à prova de água foi posicionado em outro furo feito na espuma, ficando em contato imediato com a haste metálica (Fig. 7). Ambos os termômetros foram fixados com o auxílio de uma fita isolante. É importante enfatizar o fato de que se a experiência for realizada apenas fixando-se os termômetros descritos nos pontos mostrados (Fig. 6), encontra-se uma discrepância de até 15 °C ao logo da haste, com uma variação que não é linear. A temperatura mais baixa fica mais próxima do centro da barra, como foi descrito anteriormente.

Após a montagem do equipamento, este foi armazenado na caixa térmica de isopor, juntamente com a primeira foi alocada a outra estrutura montada de maneira mais simples, apenas com o intuito de comparação entre os dois equipamentos como foi descrito acima (Fig. 11).



Figura 11 - Equipamentos montados seguindo metodologias diferentes.

Ao final da montagem, o gelo foi depositado sobre toda a estrutura (Fig. 9), com o intuito de fornecer uma melhor condição de trabalho, ao impedir o contato direto entre o ar e a haste, o que provocaria uma troca intensa de calor entre eles devido à constante renovação do ar ao redor. Do aparato com o gelo, asseguramos que a temperatura no interior do recipiente se

manterá constante enquanto houver gelo. A escolha da caixa, por sua vez, teve a importância de suportar toda a estrutura e manter o gelo no estado sólido por mais tempo, devido às suas propriedades isolantes.

5. Resultados

Foram realizadas medidas através do método desenvolvido, e os resultados são apresentados nesta seção.

Antes de se começar de fato a experiência, mas já com todos os componentes montados, após a espera do equilíbrio térmico, ou seja, o momento em que todas as partes do sistema possuem o mesmo valor de temperatura, mediu-se o comprimento inicial das duas hastes com o auxílio de duas outras hastes colocadas de forma perpendicular a cada extremidade da barra, medindo-se com a trena. O erro (inevitável no caso) foi considerado, cujo comprimento inicial da haste (L_0) foi igual a $(502,00 \pm 0,05)$ mm. Posicionou-se o relógio comparador na posição “zero”. Como a haste se expande, o ponteiro do marcador se moverá no sentido anti-horário, sendo o erro do relógio comparador igual a 0,01 mm. Um cronômetro, também inicialmente no “zero” foi o responsável por marcar o tempo decorrente do início do experimento, apresentando um erro de 0,01 segundo. Os valores da temperatura ao longo da haste metálica foram medidos com termopares que possuem erro igual a 001 °C. Já a temperatura da água foi medida através de termômetro químico cujo erro é igual a 0,5 °C. O experimento decorreu por 37 minutos e 30 segundos e os intervalos entre as leituras foram condicionados por qualquer alteração significativa que ocorreu no sistema, permitindo assim, que o máximo de detalhes, sendo eles

ocasionadores de erros ou não, pudessem ser captados e anotados. Os valores marcados no relógio comparador começaram a ser analisados a partir do momento em que o sistema envolvendo a água dentro do reservatório entrou em equilíbrio térmico, que foi possível mensurar e acompanhar as alterações térmicas ao longo do tempo através do termômetro químico localizado na tampa do recipiente de água do gerador de vapor.

Tendo em vista que os erros sistemáticos e os aleatórios podem acontecer nesse tipo de situação [14, 15], tomou-se o cuidado de impedir que erros grosseiros pudessem ser cometidos e, caso fossem notados, pudessem ser resolvidos de forma rápida, não prejudicando o andamento da experiência. Então, esperou-se por três minutos e as temperaturas continuaram coincidindo, ou seja, conseguiu-se uma situação de equilíbrio durante um intervalo de tempo significativo. Pode ser observado na Tabela 1, que a partir do momento de 30 minutos e 53 segundos, as temperaturas são iguais, o que não era possível de se obter e comprovar pelo método tradicional já existente de se realizar a experiência de dilatação térmica linear. No método utilizado nas instituições de ensino, cada ponto ao longo da haste metálica possui um valor diferente para a temperatura. Pressupõe-se que esse seja o real motivo para este método tradicional [10] sugerir calcular o valor da temperatura final da haste como a média dos valores das temperaturas marcadas tanto no início quanto no final da haste. Mas como foi exposto na introdução do trabalho, não faz sentido falar em temperatura final da haste, mesmo quando o sistema está em equilíbrio térmico, pois ela possui temperaturas que não são iguais em diferentes pontos.

Tabela 1 - Medidas obtidas através da nova metodologia.

Tempo (min.)	Leitura termopar 1 (°C)	Leitura termopar 2 (°C)	Temperatura da água (°C)	Leitura dilatômetro (mm)
0,00	001	003	29,5	-
5,00	001	002	43,0	-
11,00	000	002	70,0	-
15,00	000	002	88,5	-
18,50	085	088	97,0	0,77
19,50	090	090	97,0	0,79
20,50	090	094	97,0	0,76
21,50	089	094	97,0	0,72
27,33	089	093	97,0	0,75
29,00	093	092	97,0	0,75
30,53	091	091	97,0	0,75
32,33	091	091	97,0	0,74
34,00	090	090	97,0	0,74
34,30	089	089	97,0	0,74
37,30	093	087	97,0	0,81*

Com isso, fez-se a leitura do termômetro infravermelho que se encontrava abaixo do gelo, e verificou-se mais uma vez haver estabilidade entre as três temperaturas ao longo da haste, que marcavam (091 ± 001) °C no

momento. Sendo o valor aferido por esse instrumento considerado no cálculo de erros da última medida da temperatura. No entanto, para fazer essa leitura, foi necessário deslocar uma quantidade grande de gelo, o

que interferiu na leitura do dilatômetro, o qual marcou um valor um pouco acima do que estava marcando (valor representado por * na Tabela 1). Verificou-se, então, no outro relógio que o valor era igual ao último marcado antes do erro acontecer, cuja leitura foi igual a $(0,74 \pm 0,01)$ mm, coincidindo com o da outra haste. Assim, foi confirmada mais uma medida coincidente, o que é importante para a conquista do nosso objetivo principal: a estabilidade entre as temperaturas da barra de cobre. Tratando-se os dados pela teoria dos erros, conseguiu-se encontrar o valor de α_L (coeficiente de dilatação linear) com o seu respectivo erro.

Assim, através da metodologia desenvolvida foi possível aferir de forma direta a verdadeira temperatura final da haste metálica e calcular o coeficiente de dilatação térmica linear do cobre. Agora, pode-se aferir o valor da temperatura final e o coeficiente de dilatação para as outras hastes constituídas de latão ou de alumínio.

A seguir, encontram-se os gráficos obtidos no processo de aferição da expansão e da temperatura da haste metálica de cobre em função do tempo, com a finalidade de comparação e visualização dos resultados. Os pontos nos gráficos representam as médias entre os valores encontrados pelos três termômetros. Os resultados apresentados na Fig. 12 foram obtidos com desvio padrão de 1% e os resultados na Fig. 13, com desvio padrão de 2%. Nota-se, pelo segundo gráfico, que após um determinado período de tempo ocorre a estabilização da temperatura da haste.

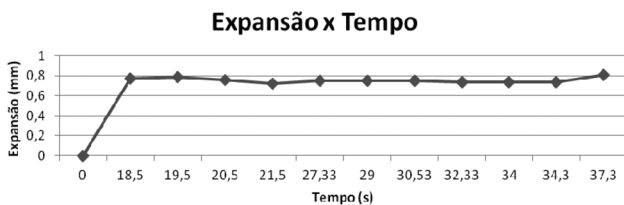


Figura 12 - Gráfico da expansão linear em função do tempo.

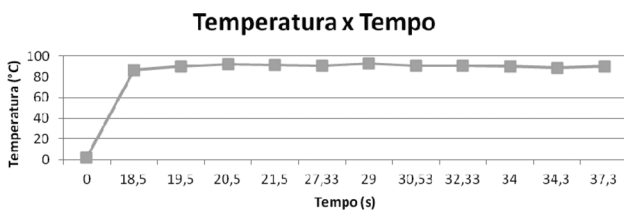


Figura 13 - Gráfico da temperatura da haste em função do tempo.

Calculou-se o coeficiente de dilatação térmica linear (α_L) realizando o ajuste dos dados experimentais com a seguinte equação

$$\alpha_L = \frac{l_f - l_i}{l_i(T_f - T_i)}, \quad (1)$$

sendo l_i o comprimento inicial; l_f o comprimento final; T_i a temperatura inicial e T_f a temperatura final [1, 6].

Ajustou-se a Eq. (1) aos dados experimentais, tratados sistematicamente e foi obtido

$$\alpha_L = (1,70 \cdot 10^{-5} \pm 0,32 \cdot 10^{-5}) \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Para obter este valor foram utilizadas as seguintes equações para propagação de erro aleatório [15]:

- Média de um conjunto de medidas com n valores

$$m = \frac{1}{n} \sum x_i. \quad (2)$$

- Estimativa do desvio padrão de um conjunto de n medidas de uma grandeza

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum (x_i - m)^2}. \quad (3)$$

- Estimativa do desvio padrão das médias de n valores

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{(n-1)n} \sum (x_i - m)^2} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

- Expressão do resultado de n medições

$$m \pm S_m. \quad (5)$$

E para propagação de erros e incertezas:

- Adição e Subtração de valores experimentais

$$(x \pm \Delta x) \pm (y \pm \Delta y) = (x \pm y) \pm (\Delta x + \Delta y). \quad (6)$$

- Multiplicação de grandezas experimentais

$$(x \pm \Delta x) \cdot (y \pm \Delta y) = (x \cdot y) \pm (x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x). \quad (7)$$

- Divisão de grandezas experimentais

$$(x \pm \Delta x) \div (y \pm \Delta y) = (x \div y) \pm (x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x) / y^2. \quad (8)$$

O coeficiente de dilatação encontrado foi obtido à temperatura próxima do ambiente, mas ele pode ter dependência da temperatura. A Fig. 14 mostra esta relação para o cobre.

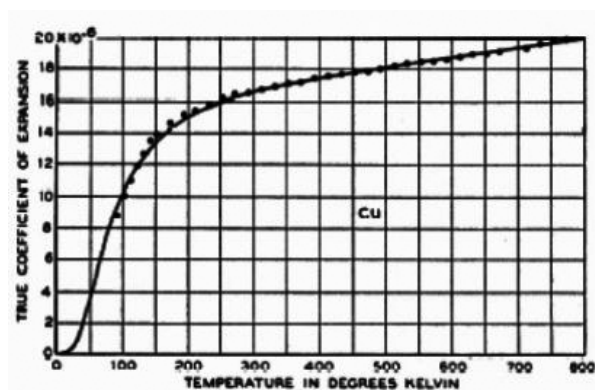


Figura 14 - Coeficiente de dilatação em função da temperatura. Fonte: Ref. [16].

Assim, o experimentador tem como objetivo das suas atividades fazer uma análise quantitativa de diversas características do sistema observado, através de repetidas medições das grandezas físicas de seu interesse. Sendo que no processo de medições são incluídos os erros, pois nenhum instrumento está isento dos mesmos. No entanto, não se pode tratar o erro como um engano, pois este aparece devido à falta de habilidade do experimentador, o que é possivelmente evitável.

Não há significação na apresentação de uma medida sem expressar o erro desta, uma vez que esta medida pode estar muito distante do valor real da grandeza, contudo a teoria de erros também não nos dá o valor real da medida, e sim uma estimativa do erro máximo [17].

6. Conclusão

No presente trabalho, foi desenvolvido um método para a correta aferição da temperatura final da haste em um experimento de expansão térmica que apresentava uma limitação em aferir esta, utilizado em laboratório de física do IF Sudeste MG – JF. Um dos maiores problemas neste experimento é justamente conseguir medir a temperatura final do corpo de prova, e assim, calcular corretamente o coeficiente de dilatação térmica do material. Experimentos de baixo custo são considerados difíceis de realizar uma avaliação quantitativa e verificar com exatidão os resultados obtidos em relação aos valores teóricos. Logo, uma alternativa muito utilizada é a aquisição de equipamentos caros, mas que às vezes apresentam problemas quanto à teoria e o método utilizado, os quais violam conceitos físicos importantes.

Assim, o principal problema, que era encontrar a temperatura final da haste de cobre, com materiais de baixo custo, foi resolvido de maneira confiável, correta e objetiva. E o principal resultado alcançado foi a elaboração de uma nova metodologia para a aferição da correta temperatura final de hastes metálicas no experimento de dilatação térmica linear, sem a qual os resultados experimentais não tem significado científico. Deste modo, a metodologia de medição e ensino elaborada em laboratório estimula a participação ativa dos

estudantes envolvidos, despertando a curiosidade e o interesse destes, não se tratando de um método laboratorial tradicional de ensino, no qual é seguido o procedimento pré-estabelecido, restando somente a elaboração dos cálculos com os dados coletados. Essa metodologia inovadora faz com que os alunos identifiquem o evento, pensem em seu significado e qual é a sua importância, estimulando assim, a resolução do problema em questão [5, 18].

Portanto, a metodologia desenvolvida é simples e fácil de ser reproduzida seguindo este trabalho, resultando em um experimento de baixo custo e eficiente, com precisão suficiente para os estudos de conceitos, definições e temas da área de termologia.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora pelo apoio. Ao CNPq e ao FINE pelo auxílio financeiro. Aos alunos e bolsistas do grupo de pesquisa do programa de educação tutorial, PET – Física, do qual fazemos parte: Aline Aparecida Tagliante Amaral, José Francys Costa Moraes e Sérgio Luiz França, pelo auxílio à execução do experimento.

Referências

- [1] A.F. Padilha. *Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades* (Hemus, Curitiba, 2000), p. 289.
- [2] W.D. Callister, *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução* (LTC, São Paulo, 2002), 5ª ed., p. 451.
- [3] J.B. Russell, in *Química Geral* (Makron Books, São Paulo, 1994), 2ª ed, v. 2, p. 454-508.
- [4] N.D. Mora; J.C. Sihvenger, in *Apostila de Química Geral* (UNIOESTE/LaMat, Foz do Iguaçu, 2006), p. 61-97, disponível em <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downquimica.html>, consultado em 1/9/2012.
- [5] M.S.T. Araújo e M.L.V.S. Abib, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 2 (2003).
- [6] ASM International Handbook Committee, in: *Metals Handbook: Desk Edition*, editado por J.R. Davis (ASM Internacional, Ohio, 1998), 2ª ed, p. 9-16.
- [7] J.P.S. Azevedo, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* **11**, 4 (1995).
- [8] F.M.B. Lima, *Demonstração da Existência de Dilatação Térmica e Medida do Coeficiente Linear de Dilatação*. Relatório Final, IFGW Unicamp, 2008.
- [9] J.P. Mosnier, *Measuring the Coefficient of Thermal Expansion of Copper, Steel and Aluminium*. Lab Instruction Sheets, DCU, 2002.
- [10] J.R. Pimentel e A.I. Ruiz, *Cad. Cat. Ens. Fís.* **5**, 2 (1988).

- [11] L.F. Souza, *Experimento sobre Dilatação Térmica e a Lei do Resfriamento*. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ, 2007.
- [12] I.L. Batista, *Ciência & Educação* **10**, 3 (2004).
- [13] D.I. Bower, *An Introduction to Polymer Physics* (Cambridge University Press, New York, 2002).
- [14] J.W. Precker e W.P. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **19**, 3 (1997).
- [15] M.H. Tabacniks, *Conceitos Básicos da Teoria de Erros* (IFUSP, São Paulo, 2003), disponível em <http://stoa.usp.br/fap0181/files/70/162/ConcBasTeorErr-c.pdf>, consultado em 21/8/2011.
- [16] F.C. Nix and D. MacNair, *Physical Review* **60**, 8 (1941).
- [17] J.H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros* (Edgar Blücher, São Paulo, 1996), 2^a ed.
- [18] M.A. Moreira e C.E. Levandowisk, *Diferentes Abordagens ao Ensino de Laboratório* (Editora da UFRGS, Porto Alegre, 1983).