

Estudo dos coeficientes de dilatação térmica do teflon, do alumínio e da alumina

C. Abrantes,^a C. Cortez Jr.,^a G. Alexandre,^a M. A. Bigoto,^a Y. Michelin^a

^aEscola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, Lorena, Brasil

Resumo

Neste experimento, foram analisados os coeficientes de dilatação térmica, α , de três materiais: um polímero (teflon), um metal (alumínio) e uma cerâmica (alumina). Para isto, resfriaram-se as amostras no nitrogênio líquido e então deixou-se que aquecessem naturalmente, medindo-se com extensômetros as variações de comprimento (ΔL) e com um sensor de platina (PT1000) as variações na temperatura. Com esses dados, traçaram-se as curvas de $\Delta L/L_0$ (sendo L_0 o comprimento inicial) em função da temperatura, de tal forma que a inclinação das retas tangentes à essas curvas fornecessem os valores de α . Os resultados obtidos indicaram que, em geral, $\alpha_{Teflon} > \alpha_{Alumínio} > \alpha_{Alumina}$ e que os valores de α tendem a diminuir com o aumento da temperatura. O teflon foi exceção à essa regra, uma vez que esse material apresenta mudanças de fase próximas à temperatura ambiente.

Palavras-chave: coeficiente; dilatação; térmica; teflon; alumínio; alumina.

1. Introdução

1.1 Capacidade Calorífica

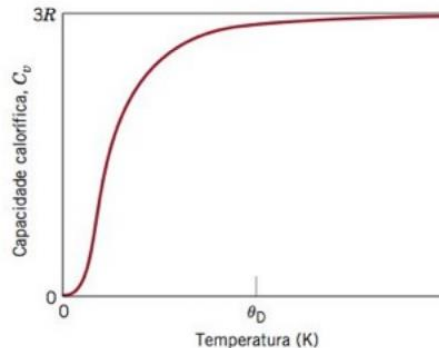
A capacidade térmica de um material é uma propriedade térmica que pode ser definida como a quantidade de energia necessária para que esse material aumente sua temperatura em um grau da unidade de temperatura em questão [1]. Essa propriedade é expressa da seguinte forma:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1)$$

Na expressão, dQ representa a quantidade de energia para que exista uma variação dT na temperatura.

A capacidade calorífica apresenta dependência com a temperatura. Tal dependência está ilustrada na figura 1.

Figura 1 – Dependência da capacidade calorífica com relação a temperatura.



Fonte: CALLISTER [1]

Como pode-se ver na figura 1, próximo a baixas temperaturas ($\sim 0K$), C_v tende a 0. Conforme a temperatura ultrapassa a temperatura de Debye (θ_D), C_v tende a se estabilizar. Assim, perde-se a dependência com relação a temperatura, mantendo-se num valor próximo a $3R$, sendo R a constante universal dos gases.

1.2 Expansão Térmica

Quando uma variação de temperatura é aplicada a um material, é esperado que o mesmo contraia ou dilate, conforme for resfriado ou aquecido, respectivamente. Esse comportamento observado no comprimento da amostra é descrito pela seguinte expressão:

$$\frac{L_f - L_0}{L_0} = \alpha_L(T_f - T_0) \Rightarrow \frac{\Delta L}{L} = \alpha_L \Delta T \quad (2)$$

Tal que α_L é o coeficiente de dilatação linear. Analogamente, quando se analisa esse comportamento para o volume total, obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha_V \Delta T \quad (3)$$

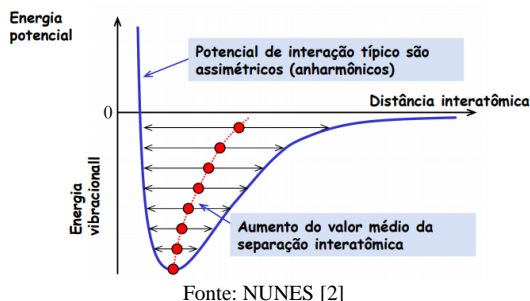
Tal que α_V é o coeficiente de dilatação volumétrica. É possível também verificar-se a seguinte relação entre os coeficientes de dilatação linear e volumétrica:

$$\alpha_V = 3\alpha_L \quad (4)$$

A expansão térmica, de fato, representa o distanciamento entre os átomos que ocorre com o aumento de temperatura aplicado no material [1]. As ligações químicas influenciam na distância entre os átomos, logo elas definem a expansão térmica, sendo esta diferente para cada tipo de material dependendo do seu tipo de ligação.

Como cada ligação é definida por determinada largura e profundidade do poço potencial da energia interatômica, pode-se compreender melhor o conceito de expansão térmica a partir da análise do gráfico de energia potencial por distância interatômica apresentado na figura 2 a seguir.

Figura 2 - Energia potencial por distância interatômica



O objetivo desse trabalho é obter medidas experimentais do coeficiente de dilatação térmica de amostras de alumínio, alumina e teflon. A fim de comparação, as medidas teóricas para os respectivos coeficientes são: $23,6 \times 10^{-6} K^{-1}$, $7,6 \times 10^{-6} K^{-1}$ e $(126 - 216) \times 10^{-6} K^{-1}$ [2].

2. Materiais e métodos

Para a realização do experimento, utilizaram-se os seguintes materiais:

- Amostras de teflon, alumínio e alumina;
- Extensômetros uniaxiais modelos PA-06-060BG-350-LEN da Excel Sensores;
- Suporte de cobre;

- Fita adesiva de alumínio;
- Sensor PT1000;
- Cabos e fios;
- Fonte de corrente modelo 100 da marca LakeShore;
- Multímetro modelo 2000 da marca Keithley;
- Criostato de poliestireno;
- Pontes de Wheatstone da National Instruments, modelo NI9237;
- Ferro para soldar;
- Estanho para solda;
- Nitrogênio líquido.

O experimento consistiu na observação experimental do comportamento dos coeficientes de dilatação térmica para três materiais: um polímero (teflon), um metal (alumínio) e uma cerâmica (alumina). Para isso, foram fixados extensômetros na superfície dos três materiais e eles foram então presos sobre um suporte de cobre com fita adesiva de alumínio. Ao lado do suporte, foi colocado um sensor de platina PT1000 (fixado também com fita de alumínio), cuja resistência apresenta variação linear com a temperatura. Do sensor, saíram 4 fios: 2 deles estavam conectados à fonte de corrente e os outros 2 ao medidor de tensão, conforme ilustrado na figura a seguir:

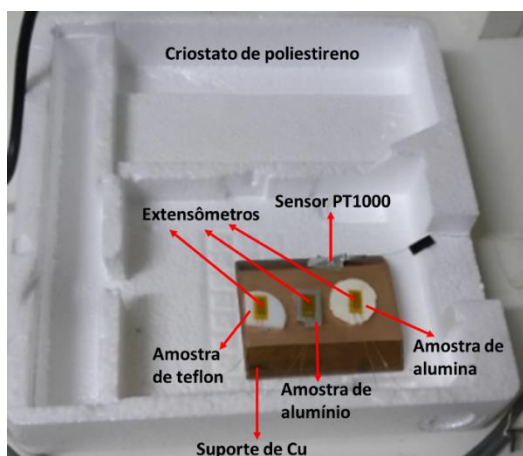
Figura 3 - esquema das conexões no sensor



Fonte: os autores

O aparato foi colocado em um criostato de poliestireno, onde mais tarde seria vertido nitrogênio líquido com o intuito de baixar a temperatura. A figura abaixo ilustra essa montagem:

Figura 4 - Esquema do aparato experimental



Fonte: os autores

Os terminais de cada extensômetro foram soldados em cabos por meio dos fios em suas extremidades; esses cabos foram então conectados cada um em uma ponte de Wheatstone, que por sua vez foram conectadas ao computador para envio de dados ao software. Os extensômetros presos nas amostras na figura 2 foram conectados, da esquerda para a direita, em canais doravante denominados 0, 1 e 2 respectivamente. Vale ressaltar que o multímetro também foi conectado ao computador para o envio dos dados de tensão.

Na fonte de alimentação, a corrente foi fixada em $100\ \mu\text{A}$. Feito isso, os aparelhos foram todos ligados e iniciou-se o derramamento de nitrogênio líquido no aparato dentro do criostato. Durante esse processo, o extensômetro conectado ao canal 2 acabou se desprendendo da alumina e, por isso, os dados obtidos pelo software no canal 2 foram desprezados e dados de outro experimento, realizado nas mesmas condições do atual, foram fornecidos para que se obtivessem todos os resultados para posterior análise de dados. Jorrou-se nitrogênio líquido no aparato até que a leitura de tensão se estabilizasse, o que significava que o sistema havia entrado em equilíbrio térmico.

A partir de então, deixou-se o sistema esquentar até a temperatura ambiente e, uma vez conhecidas a corrente aplicada (constante e igual a $100\ \mu\text{A}$) e a tensão medida (enviada ao software pelo multímetro), foi possível calcular, durante todo o aquecimento, as diversas temperaturas nas quais se encontrava o aparato experimental por meio de uma tabela que associa as resistências do sensor com as suas temperaturas.

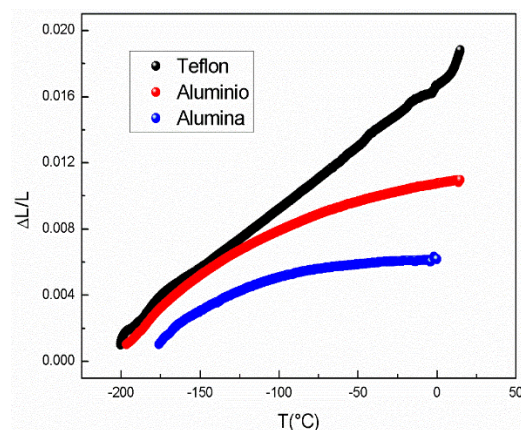
Uma vez conhecidas as temperaturas- medidas conforme dito anteriormente- e os valores de $\Delta L/L$ - calculados pelo software por meio do desbalanceamento das pontes de Wheatstone-, foi possível utilizar a equação (2) para estimar o coeficiente de dilatação térmica para os três materiais em certos intervalos de temperatura.

É importante lembrar que o coeficiente α apresenta dependência com a temperatura. Nessa perspectiva, como as curvas obtidas não eram lineares, foram tomadas em cada curva três regiões aproximadamente lineares. O coeficiente de dilatação térmica na faixa de temperaturas de cada uma das três regiões citadas anteriormente foi então aproximado como sendo o coeficiente angular das retas que passavam por elas. O intuito desse tipo de aproximação foi encontrar um valor aproximado para α em diferentes faixas de temperatura, constatando desta forma a dependência entre eles (α e T).

3. Resultados e discussão

A figura 5 ilustra as curvas de $\Delta L/L \times T$ obtidas para os três materiais (teflon, alumínio e alumina)

Figura 5 – Curvas de $\Delta L/L \times T$ para os três materiais



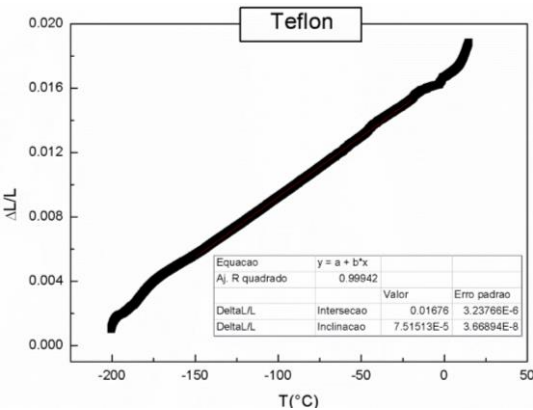
Fonte: Os autores (software OriginPro 8)

É possível constatar por meio da figura 5 que, em geral, para uma mesma faixa de temperaturas, os coeficientes de dilatação obedecem à seguinte desigualdade: $\alpha_{\text{Teflon}} > \alpha_{\text{Alumínio}} > \alpha_{\text{Alumina}}$. Além disso, percebe-se também que, por volta de $T = 0^\circ\text{C}$, as curvas apresentam variações nos pontos experimentais. Isso ocorre pois, para temperaturas menores do que 0°C , formou-se uma camada de gelo ao redor do aparato experimental; desta maneira, quando essa

temperatura ($T = 0^{\circ}\text{C}$) é atingida, esse gelo começa a derreter, ocasionando essas dispersões que se manifestaram nas medidas.

A seguir, nas figuras 6, 8 e 9, serão apresentadas as curvas de $\Delta L/L \times T$ de cada material de forma isolada. Nessas figuras encontram-se destacadas as regiões utilizadas para o cálculo dos coeficientes de dilatação térmica.

Figura 6 - curva de $\Delta L/L \times T$ para o teflon



Fonte: Os autores (Software OriginPro 8)

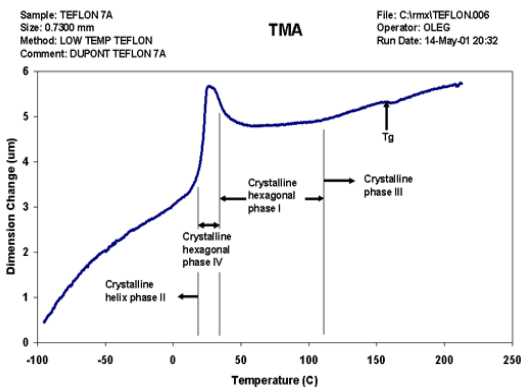
Conforme se observa na figura 6, a curva obtida para o Teflon apresenta comportamento aproximadamente linear. Isso significa que seu coeficiente de dilatação, α_{Teflon} não apresenta grandes variações no intervalo de temperaturas analisado. Desta maneira, foi destacada apenas uma região para o cálculo de α_{Teflon} (região em vermelho no gráfico) e o resultado da análise linear para essa região é apresentado na tabela 1. O valor encontrado para o coeficiente de dilatação térmica do teflon foi:

$$\alpha_{Teflon} = (75,15 \pm 0,04) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Na literatura [2], encontra-se que os valores de α_{Teflon} na temperatura ambiente variam entre

126 e $216 \mu K^{-1}$. Tais valores apresentam a mesma ordem de grandeza do valor encontrado no presente trabalho, mas são relativamente diferentes entre si (erro relativo de 40% com relação ao menor valor, $126 \mu K^{-1}$). Essa diferença já era esperada pois, conforme dito anteriormente, o coeficiente de dilatação é dependente da temperatura e a região utilizada para o cálculo está abaixo de 0°C , enquanto que a temperatura ambiente é de aproximadamente 20°C . Vale ressaltar que, analisando a região final da curva na figura 6, nota-se uma possível mudança abrupta na curva, de tal forma que o valor de α se alteraria, aumentando de valor. De acordo com os resultados da literatura [3], isso de fato ocorre, e se deve a uma mudança de fase no material, conforme ilustra a figura a seguir:

Figura 7 – Curva de $\Delta L/L \times T$ para o Teflon



Fonte: ANDERSON MATERIALS [3]

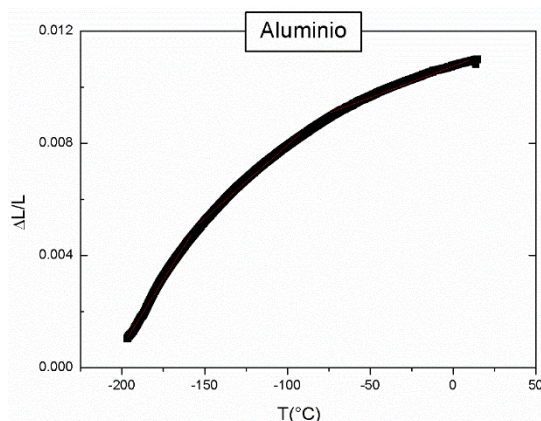
Nessa perspectiva, constata-se que poderia ser encontrado um valor mais próximo ao apresentado na literatura [2] se mais pontos de temperaturas fossem plotados na curva do teflon.

O próximo material a ser estudado é o alumínio. Sua curva de $\Delta L/L \times T$ é apresentada na figura 8.

Tabela 1 – Análise linear para o teflon

Equação	$y = a + b \cdot x$			
		Valor	Erro padrão	R^2 ajustado
$\Delta L/L$	Intersecção	0,01676	$3,23766 \cdot 10^{-6}$	0,99942
	inclinação	$7,515131 \cdot 10^{-5}$	$3,66894 \cdot 10^{-8}$	

Fonte: Os autores (software OriginPro 8)

Figura 8 - curva de $\Delta L/L \times T$ para o alumínio

Fonte: os autores (software OriginPro 8)

Nota-se na figura 8 que, diferentemente da curva para o teflon, a curva do alumínio não apresenta comportamento linear; desta forma, subdividiu-se tal curva em três regiões aproximadamente lineares, de tal forma que se pudessem calcular três valores aproximados de α_{teflon} nesses intervalos de temperatura. Para efetuar esse cálculo, foram feitas análises lineares das três retas, que são apresentadas na tabela 2. Os valores encontrados para os coeficientes de dilatação térmica do alumínio foram:

$$\alpha_{Alumínio}^1 = (95,73 \pm 0,39) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_{Alumínio}^2 = (52,32 \pm 0,13) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_{Alumínio}^3 = (22,33 \pm 0,04) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

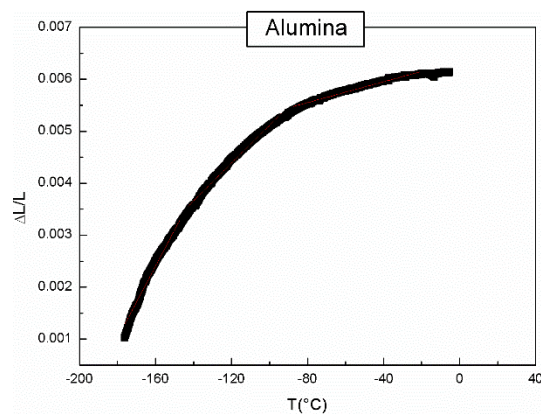
Tal que esses valores são relativos aos intervalos de temperatura demarcados pelas linhas vermelhas na figura 8 em ordem crescente.

Os valores encontrados representam de maneira muito clara a dependência dos coeficientes de dilatação com a temperatura uma vez que, para

temperaturas menores, tais coeficientes são maiores. Isso já era observável na figura 8, dado que a inclinação das retas tangentes diminui com o aumento da temperatura.

Vale ressaltar também que o último valor encontrado para o coeficiente de dilatação, $\alpha_{Alumínio}^3$, relativo ao intervalo de temperaturas que mais se aproxima da temperatura ambiente, é muito próximo daquele encontrado na literatura ($\alpha_{Alumínio} = 23,6 \cdot 10^{-6}$) [2], apresentando erro relativo de 5,4%. Isso corrobora a confiabilidade dos dados obtidos experimentalmente

Por último, foi analisada a cerâmica (alumina), cuja curva de $\Delta L/L \times T$ é apresentada na figura 9:

Figura 9 - curva de $\Delta L/L \times T$ para a alumina

Fonte: Os autores (software OriginPro 8)

Da mesma forma que foi feito com a curva do alumínio na figura 8, foram desenhadas na curva da cerâmica três segmentos de reta, que auxiliaram no cálculo de três coeficientes de dilatação para três intervalos de temperatura. As análises lineares dessas três retas são apresentadas na tabela 3.

Tabela 2 – Análises lineares para o Alumínio

Equação	$y = a + b \cdot x$			
		Valor	Erro padrão	R^2 ajustado
$\Delta L/L$	Intersecção	0,01988	$6,74299 \cdot 10^{-5}$	0,9946
	inclinação	$9,5728 \cdot 10^{-5}$	$3,87726 \cdot 10^{-7}$	
$\Delta L/L$	Intersecção	0,01317	$1,54243 \cdot 10^{-5}$	0,9943
	inclinação	$5,23227 \cdot 10^{-5}$	$1,2767 \cdot 10^{-7}$	
$\Delta L/L$	Intersecção	0,01075	$1,03822 \cdot 10^{-6}$	0,9911
	inclinação	$2,23292 \cdot 10^{-5}$	$3,53171 \cdot 10^{-8}$	

Fonte: Os autores (software OriginPro8)

Tabela 3 – Análises lineares para a Alumina

Equação	$y = a + b \cdot x$	Valor	Erro padrão	R^2 ajustado
$\Delta L/L$	Intersecção	0,01347	$1,15559 \cdot 10^{-4}$	0,97694
	inclinação	$6,91499 \cdot 10^{-5}$	$7,28164 \cdot 10^{-7}$	
$\Delta L/L$	Intersecção	0,00877	$1,75834 \cdot 10^{-5}$	0,98857
	inclinação	$3,64992 \cdot 10^{-5}$	$1,50394 \cdot 10^{-7}$	
$\Delta L/L$	Intersecção	0,00635	$1,75627 \cdot 10^{-6}$	0,98016
	inclinação	$1,00229 \cdot 10^{-5}$	$3,32349 \cdot 10^{-8}$	

Fonte: Os autores (software OriginPro8)

Portanto, os valores encontrados para os coeficientes de dilatação térmica da alumina foram, em ordem crescente de intervalos de temperatura:

$$\alpha_{Alumina}^1 = (69,15 \pm 0,73) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_{Alumina}^2 = (36,50 \pm 0,15) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_{Alumina}^3 = (10,02 \pm 0,03) \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

Os valores encontrados apresentam comportamento semelhante àqueles observados para o alumínio, isto é, eles deixam explícita a dependência de α com a temperatura, refletindo a diminuição da inclinação das retas tangentes à curva da figura 9 conforme se aumenta a temperatura. É importante ser ressaltado que o valor de $\alpha_{Alumina}^3$, que é aquele localizado na região mais próxima da temperatura ambiente, também é próximo do que se encontra na literatura [2] ($\alpha_{Alumina} = 7,6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), apresentando erro relativo de 24,2%. Essa diferença decorre do fato de que o valor foi calculado para temperaturas menores do que 0°C, que são inferiores à temperatura ambiente.

4. Conclusão

Os dados obtidos experimentalmente refletiram aquilo que era teoricamente esperado: os coeficientes de dilatação térmica para os três materiais são distintos entre si (α depende do material), obedecendo em geral à desigualdade $\alpha_{Teflon} > \alpha_{Alumínio} > \alpha_{Alumina}$. α apresentou também dependência com a temperatura, conforme discutido inicialmente. Os valores encontrados para os coeficientes se mostraram relativamente próximos aos da literatura [2], com divergências de 40% para o teflon, 5,4% para o alumínio e 24,2% para a alumina; os resultados não foram ainda mais próximos porque os dados da literatura [2] são obtidos para a temperatura ambiente e os experimentais foram obtidos para temperaturas um pouco menores. No caso do

teflon, a divergência foi maior pois, próximo à temperatura ambiente, esse material muda de fase, apresentando uma grande alteração no valor de α .

Vale ressaltar também que, nos pontos da curva próximos à temperatura de 0°C, foram observadas algumas divergências nos dados empíricos com relação ao que era esperado na teoria. Isso ocorreu devido à formação, ao redor do aparato, de uma camada de gelo, que começou a fundir quando essa temperatura foi atingida, causando flutuações nos dados experimentais. Outro problema encontrado foi que a amostra de alumina se desprende do suporte de Cu quando o nitrogênio líquido foi vertido no aparato; desta forma, é importante ressaltar que as amostras devem ser bem presas e o líquido criogênico, derramado cuidadosamente.

Por fim, os problemas encontrados não interferiram de maneira crítica nos resultados obtidos e, desta forma, o experimento foi bem-sucedido em auxiliar nos estudos realizados acerca do coeficiente de dilatação térmica.

REFERÊNCIAS

- [1] CALLISTER, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc Ltda., 2012.
- [2] NUNES, Cristina Bórmio. **Dilatação Térmica**. 2018. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4316251/mod_resource/content/1/DilatacaoTermica.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2018.
- [3] ANDERSON MATERIALS. **CTE, Thermal Expansion**. Disponível em: <<http://www.andersonmaterials.com/cte-thermal-expansion.html>>. Acesso em: 29 jun. 2018.