

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Relatório 6

**Medidas de dilatação térmica do Al, Co, Alumina e
Teflon[®] com extensômetro**

Emanuel Brito dos Santos - 9773301
Francisco Tavares Silva Padrão - 9773211
Laura Martins Carreira - 9773340
Rennan da Silva Cardoso - 9773315
Thiago Gonçalves Guimarães Lopes - 9773166

Lorena

24 de junho de 2019

Emanuel Brito dos Santos - 9773301
Francisco Tavares Silva Padrão - 9773211
Laura Martins Carreira - 9773340
Rennan da Silva Cardoso - 9773315
Thiago Gonçalves Guimarães Lopes - 9773166

Medidas de dilatação térmica do Al, Co, Alumina e Teflon[®] com extensômetro

Relatório Experimental apresentado na disciplina LOM3230 - Métodos Experimentais da Física III, sob orientação da Profa. Dra. Cristina Bormio Nunes.

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de Lorena
Departamento de Engenharia de Materiais

Lorena
2019

Resumo

As propriedades térmicas dos sólidos são informações fundamentais para o estudo básico e para as aplicações dos mais diversos materiais. Em particular, o estudo da deformação física em função da temperatura, por meio do fenômeno de expansão térmica, tem consequências importantes no desenvolvimento de materiais. O trabalho se propôs a analisar o comportamento da deformação de amostras de Alumínio, Cobalto, Alumina e Teflon[®] com a temperatura, através do uso de extensômetro e termorresistor, variando-se a temperatura desde o Nitrogênio líquido (77 K) até a temperatura ambiente. Obtiveram-se os valores do coeficiente de dilatação térmica (α) e comparou-se com os dados da literatura. O valor de α do Alumínio teve um erro relativo baixo e o do Teflon[®] ficou dentro da faixa esperada, mas com um erro alto. Os demais erros, do Cobalto e da Alumina, foram bastante discrepantes.

Palavras-chaves: expansão térmica. coeficiente de dilatação térmica. extensômetro. termistor.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivo	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	Dilatação térmica	8
2.1.1	Coeficiente de dilatação térmica	9
2.1.2	Métodos para medição da dilatação térmica	10
2.2	Extensômetro	11
2.3	Termistor	11
3	METODOLOGIA	12
3.1	Materiais	12
3.2	Preparação do aparato experimental	13
3.3	Medições das dilatações térmicas	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1	Deformação <i>versus</i> temperatura do Alumínio	15
4.2	Deformação <i>versus</i> temperatura do Cobalto	16
4.3	Deformação <i>versus</i> temperatura da Alumina	18
4.4	Deformação <i>versus</i> temperatura do Teflon®	19
4.5	Cálculo do calor específico	20
5	CONCLUSÃO	21
	Anexo A	22
	Apêndice: Ponte de Wheatstone	23
	REFERÊNCIAS	25

1 Introdução

Uma das áreas de pesquisa de maior interesse atualmente, tanto do ponto de vista acadêmico quanto tecnológico é, certamente, o estudo e o desenvolvimento de novos materiais. Para isso, defronte às diversas propriedades físicas da matéria, suas propriedades termomecânicas são essencialmente importantes não somente para o entendimento de seu comportamento fundamental, mas também para obtenção e caracterização de novos materiais. (GIROTTTO; SANTOS, 2002)

Frente a esse contexto, o estudo da expansão térmica torna-se de extrema relevância. Qualquer substância, seja sólida, líquida ou gasosa, está sujeita ao fenômeno de expansão (dilatação ou contração) térmica por transferência de calor ao variar-se a temperatura. Em projetos de engenharia civil, como a construção de pontes ou linhas de trem, por exemplo, espaçamentos são deixados entre os blocos de concreto ou outros materiais são projetados justamente por causa da dilatação que os corpos sofrem. Uma ponte metálica, por exemplo, de 300 m de comprimento pode aumentar até 20 cm. (GONÇALVES, 2004) Outras diversas aplicações tecnológicas e industriais exigem materiais metálicos de baixa expansão térmica ou controlada zero, que requerem estabilidade dimensional frente a flutuações de temperatura, ou mesmo exigem materiais cerâmicos com boa resistência ao choque térmico. (SANO, 2007)

1.1 Objetivo

O presente experimento teve por objetivo analisar a dependência da deformação com a temperatura e aferir o coeficiente de dilatação térmica de amostras de Alumínio, Cobalto, Alumina e Teflon[®], por meio do uso de extensômetro e de termorresistor.

2 Revisão bibliográfica

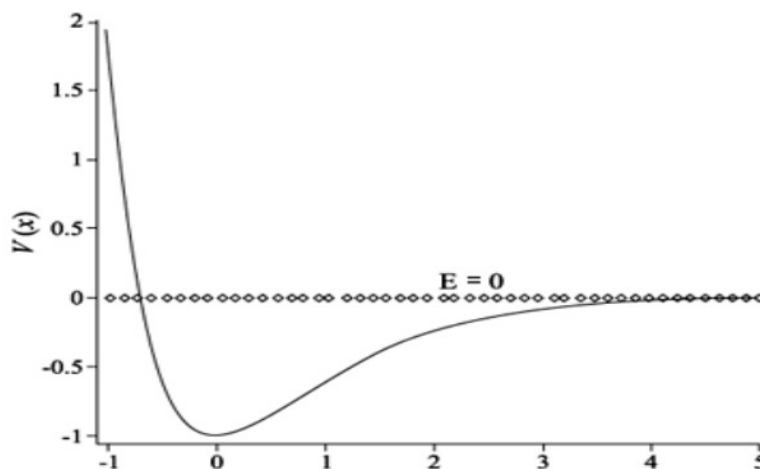
2.1 Dilatação térmica

A expansão térmica é a tendência da matéria de mudar sua forma, área e volume em resposta a uma mudança de temperatura. Os materiais sólidos, geralmente, aumentam suas dimensões – dilatação térmica – ao serem aquecidos e diminuem – contração térmica – quando submetidos a um resfriamento. (SANO, 2007)

Os sólidos são constituídos por arranjos atômicos, em que o espaço entre eles é preenchido por elétrons. Com isso, surgem as ligações químicas que mantêm a estrutura cristalina. Sabendo-se que os elétrons não podem ser localizados com perfeita precisão, há uma vibração da rede, que possui dependência com a temperatura. Ao aumentar-se a temperatura de um corpo, a vibração da rede aumenta e, assim, o volume do corpo, caracterizando a dilatação térmica. Caso a temperatura diminua, as amplitudes de oscilação também diminuem, bem como o volume do sólido, caracterizando a contração térmica. (ALMEIDA, 2016)

Este fenômeno pode ser compreendido através da curva de energia potencial em função do espaçamento interatômico para uma molécula diatômica, Figura 1: quanto maior a temperatura, maior a amplitude de oscilação até que a ligação se rompe e a energia de ligação vai a zero, com os átomos separando-se espacialmente.

Figura 1 – Gráfico de energia potencial por distância interatômica



Fonte: Costa (2016)

2.1.1 Coeficiente de dilatação térmica

Para cada classe de materiais (metais, cerâmicas e polímeros), quanto maior for a energia da ligação atômica, mais profundo e mais estreito será o poço de energia potencial. Assim, o aumento na separação interatômica em função da elevação na temperatura será menor, produzindo também um menor valor do coeficiente de dilatação térmica. Por definição, o coeficiente de dilatação térmica (α) é uma propriedade do material que indica o grau segundo o qual ocorrem mudanças nas suas dimensões em função da temperatura. (SANO, 2007)

Ao supor uma barra muito fina de tamanho L_0 a uma temperatura inicial T_i , tem-se que, variando a temperatura para T_f , a variação $\Delta L = L - L_0$ no comprimento da barra em função da variação de temperatura $\Delta T = T_f - T_i$, é dada por:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Podemos relacionar a deformação ε , dada pela eq.(2.2) abaixo, com a eq.(2.1),

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

e encontramos:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Na dilatação ($\Delta T > 0$), ε é positivo e a barra cresce, enquanto que na contração ($\Delta T < 0$), ε é negativo e a barra diminui. (ALMEIDA, 2016)

Considerando, agora, uma chapa muito fina de área A_0 a uma temperatura T_i , tem-se que, ao variar a temperatura para T_f , ocorrerá uma deformação ΔA na área da chapa. Assumindo L_{01} e L_{02} as dimensões iniciais da barra e ΔL_1 e ΔL_2 as respectivas dilatações lineares em cada lado, tem-se, utilizando a eq.(2.1), obtem-se:

$$\begin{aligned} A &= L_1 \times L_2 \\ &= (L_{01}[1 + \alpha(T_f - T_i)]) \times (L_{02}[1 + \alpha(T_f - T_i)]) \\ &= [L_{01} + L_{01}\alpha(T_f - T_i)] \times [L_{02} + L_{02}\alpha(T_f - T_i)] \\ &= [L_{01}L_{02} + 2\alpha L_{01}L_{02}(T_f - T_i)] + 2\Delta L_1\Delta L_2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Assumindo que as deformações lineares são pequenas comparadas aos comprimentos iniciais, o último termo da eq.(2.4) pode ser desprezado. Sendo $A_0 = L_{01}L_{02}$ e

fazendo as devidas manipulações, a eq.(2.4) pode ser reescrita como:

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \alpha_A \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

em que $\alpha_A = 2\alpha$ é o coeficiente de dilatação superficial do material. (ALMEIDA, 2016)

De maneira análoga, a dilatação volumétrica é aquela em que a variação em três dimensões prepondera. Portanto, a equação pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_V \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

em que $\alpha_V = 3\alpha$ é o coeficiente de dilatação volumétrico do material. (ALMEIDA, 2016)

É importante ressaltar que toda a abordagem acima leva em consideração um sólido cuja expansão térmica intrínseca é isotrópica (a mesma em todos os eixos da célula unitária).

2.1.2 Métodos para medição da dilatação térmica

Para determinar o coeficiente de dilatação térmica, duas grandezas físicas (deslocamento e temperatura) devem ser medidas em uma amostra. De forma sucinta, os principais métodos para medição de expansão térmica são: (C-Therm Technologies, 2019)

- *dilatometria*, em que uma amostra é aquecida em um forno e o deslocamento das extremidades da amostra é transmitido a um sensor por meio de tirantes. É largamente utilizada;
- *interferometria*, em que o deslocamento das extremidades da amostra é medido em termos do número de comprimentos de onda da luz monocromática, usando interferência óptica. A precisão é significativamente maior do que a da dilatometria;
- *análise termomecânica*, em que as medições são feitas com um analisador termomecânico (suporte de amostra junto a um forno para aquecimento uniforme e uma sonda que transmite mudanças de comprimento a um transdutor);
- *difração de raios X*, em que se mede a expansão térmica do material com base nas mudanças nos parâmetros de rede da célula unitária e
- *extensômetro*, em que se determina o comportamento local de peças (podem ser complexas, tais como compósitos) (SANO, 2007) e foi utilizada nesse trabalho.

2.2 Extensômetro

Extensômetros elétricos ("*strain gages*") são dispositivos medidores de deformação que transformam pequenas variações das dimensões em variações equivalentes na resistência elétrica, de modo que a seguinte relação é estabelecida:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = m \frac{\Delta V}{V} \quad (2.7)$$

em que ρ é a resistividade elétrica do material e depende da resistência lida e das características geométricas da amostra. Percebe-se, assim, que uma mudança na resistividade elétrica ocorre proporcionalmente a uma mudança volumétrica no material.

É possível mostrar que a mudança relativa na resistência é proporcional à magnitude da deformação medida, cuja relação é expressa pela eq.(2.8) abaixo:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

em que R é a resistência e K é o fator de sensibilidade à deformação do material.

Uma vez que o valor de K é determinado dependendo do material resistivo usado para o extensômetro, usa-se tal relação para encontrar a deformação, dada a resistência relativa. (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004)

O circuito empregado para medidas de deformação com extensômetro é, geralmente, uma ponte de Wheatstone, pois apresenta maior precisão para medidas de pequenas variações de resistência. (ANDOLFATO; CAMACHO; BRITO, 2004) Tal circuito, bem como a dedução da relação do seu princípio de funcionamento estão dispostos no Apêndice.

2.3 Termistor

Termistores ou termorresistores são um tipo de resistores termicamente sensíveis, cuja resistência exibe grande mudança com uma pequena variação da temperatura do corpo, devido à alteração na concentração de portadores de carga. Um termistor pode ser representado linearmente pela equação: (PARENTE, 2000)

$$\Delta R = k \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

em que k é o coeficiente de temperatura.

Dessa maneira, é possível relacionar a temperatura equivalente a cada resistência lida, de acordo com tabelas específicas do tipo de termorresistor, como o de Platina (PT1000) usado nesse trabalho.

3 Metodologia

3.1 Materiais

Os materiais – equipamentos e ferramentas – utilizados no experimento encontram-se dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais Utilizados

Materiais	Especificação
Adaptador NI	Chassi CompactDAQ USB9162
Alicate de corte	—
Amostra de Alumínio	—
Amostra de Cobalto	—
Amostra de Alumina ¹	—
Amostra de Teflon® ²	—
Cabo Rj	NI 194612C-02
Caixa de isopor	—
Computador do laboratório	—
Cola	TEK Bond 793 Saint Gobain
Estanho	—
Extensômetro	PA-06-060BG - 350 Ω - LEN
Ferro de Solda	AFR 936A
Fios conectores garra	—
Fio de Cobre para contato	2 unidades
Placa de Cobre	—
Fita adesiva de Alumínio	3M 1449 3/4"
Fio de Cobre esmaltado	AWG32 $\varnothing = 0,203$ mm
Jarra térmica	—
Lixa d'água	A320
Multímetro	KEITHLEY Model 2000 Multimeter
Módulo <i>bridge analog input</i>	Wheatstone Bridge NI – 9237
Nitrogênio líquido	—
Ponte H	—
Placa de Cobre	—
Termistor de Platina	PT1000

Fonte: autores

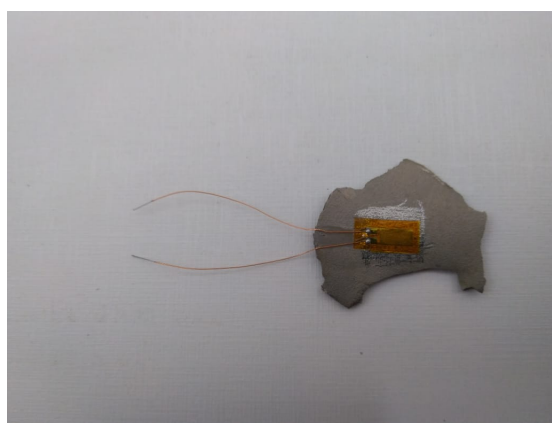
¹ Óxido de Alumínio, Al_2O_3

² Marca registrada da empresa DuPont do polímero Politetrafluoretileno (PTFE)

3.2 Preparação do aparato experimental

Primeiramente, poliram-se as quatro amostras com a lixa. Em seguida, colou-se o extensômetro na parte polida da amostra, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Amostra de Cobalto



Fonte: autores

Com o ferro de solda e o estanho, soldaram-se os terminais do extensômetro ao cabo Rj, com cuidado devido à fragilidade do extensômetro. Conectou-se o cabo auxiliar ao módulo NI - 9237 e este ao NI - 9162, ambos equipamentos da *National Instruments*. O módulo *bridge analog input* possui um circuito interno configurado como uma ponte de Wheatstone, de forma que valores diferentes de saída são obtidos conforme o extensômetro é tracionado. O terminal do módulo 9162, por sua vez, envia os sinais para o computador, os quais são coletados e tratados no programa *Labview*.

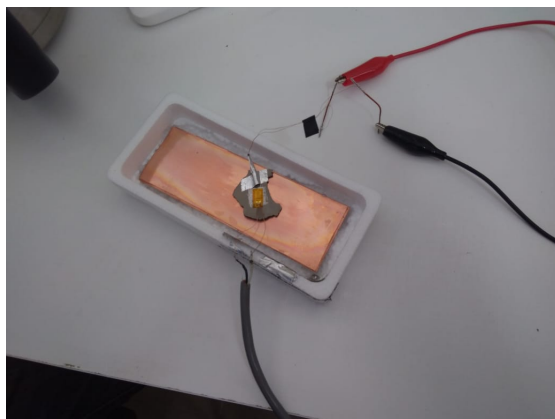
Utilizando o alicate de corte, separou-se um par de fios de Cobre esmaltado AWG32, para cada amostra. Após o corte, poliram-se suas pontas com a lixa.

Com o ferro de solda e estanho, soldaram-se os fios AWG32 no termorresistor. Já as outras extremidades do AWG32 foram soldadas no fio de Cobre para contato. Com os conectores garra, interligaram-se os contatos ao multímetro, conectado ao computador para a coleta de dados.

Utilizou-se uma caixa de isopor com um placa de cobre depositada no fundo como recipiente, a fim de diminuir a perda de calor e manter as temperaturas da amostra e do termistor aproximadamente iguais.

Com a fita adesiva de Alumínio, uniu-se a amostra ao termoresistor. O conjunto foi, então, colocado dentro do recipiente em contato com a placa para serem feitas as medições de resistência e dilatação. A Figura 3 mostra a montagem final.

Figura 3 – Montagem Final



Fonte: autores

3.3 Medições das dilatações térmicas

Submergindo a amostra de Cobalto, preencheu-se a caixa de isopor com Nitrogênio líquido. Esperou-se um tempo até que o sistema entrasse em equilíbrio térmico, atingindo aproximadamente 77 K ($-196,15^{\circ}\text{C}$).

Foram registradas as resistências do termistor e as variações espaciais da amostra de Cobalto nos programas do *Labview* e da *Keithley*, variando-se a temperatura desde 77 K até a temperatura ambiente.

Ao fim das medições, o conjunto foi desfeito, separando-se a amostra de Cobalto e o termistor. Em seguida, colou-se a amostra de Alumínio e o termoresistor na placa de Cobre. Seguindo o mesmo procedimento para resfriamento, equilíbrio térmico e coleta de dados, mediram-se a resistência do termoresistor e dilatação da amostra de Alumínio desde a temperatura do Nitrogênio líquido até a temperatura ambiente.

Repetiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para as amostras de Alumina e Teflon[®]. Todos os dados foram coletados e os cálculos e resultados obtidos estão dispostos na seção 4.

4 Resultados e discussão

Os dados de resistências do termistor e as temperaturas equivalentes foram coletados da tabela do instrumento, e os dados foram linearizados conforme experimento anterior (CARDOSO et al., 2019). A resistência foi convertida em temperatura a partir da equação (4.1).

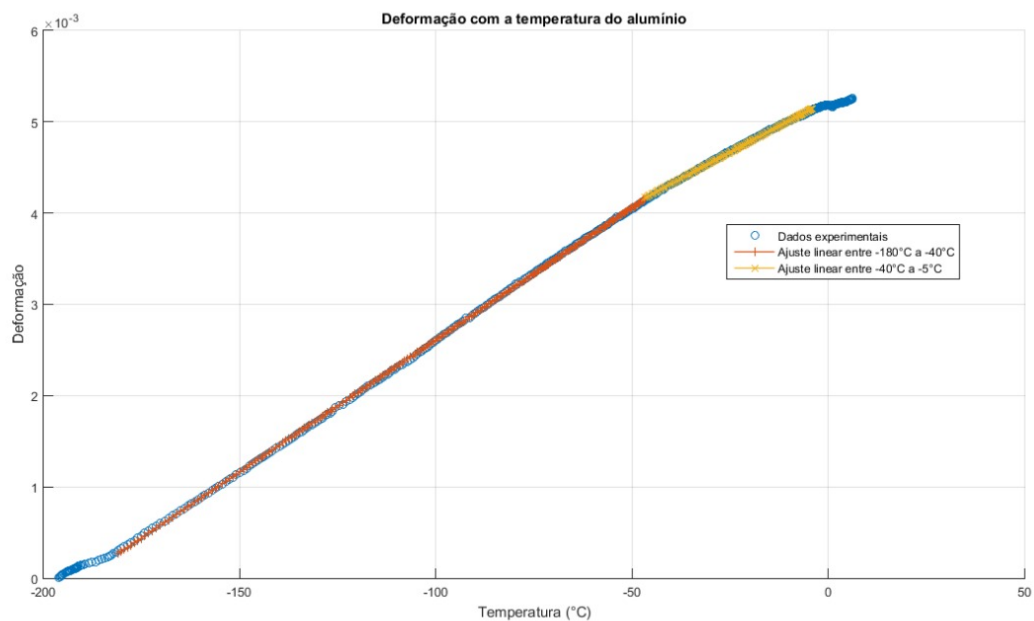
$$T = 0,2515R - 250,4066 \quad (4.1)$$

Os ajustes foram feitos descartando-se os valores das extremidades, que foram desconsiderados devido às flutuações causadas pelo regime não-estático do experimento. Assim, foi possível encontrar de forma mais precisa os valores reais das propriedades térmicas dos materiais.

4.1 Deformação *versus* temperatura do Alumínio

Os dados referentes à deformação com a temperatura para a amostra de Alumínio, bem como o ajuste linear, foram compilados no gráfico da Figura 4.

Figura 4 – Gráfico de deformação *versus* temperatura do Alumínio



Fonte: autores

No gráfico da Figura 4, foi necessário dividir em dois intervalos de temperatura para linearizar os dados. A partir da equação (2.3), tem-se que o coeficiente angular da reta linearizada dá o valor do coeficiente de dilatação térmica (α), cujos valores estão dispostos na Tabela 2, bem como o coeficiente de correlação (corr) da linearização, a comparação com os valores teóricos encontrados na literatura e o erro relativo.

Tabela 2 – Coeficiente de dilatação térmica (α) experimental e teórico para o Alumínio

Intervalo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Correlação	α experimental (10^{-5} K^{-1})	α teórico* (10^{-5} K^{-1})	Erro relativo (%)
−180 a −40	0,9999	2,887	2,114	36,57
−40 a −5	0,9983	2,246	2,239	0,29

Fonte: autores, *Kroeger e Swenson (1977)

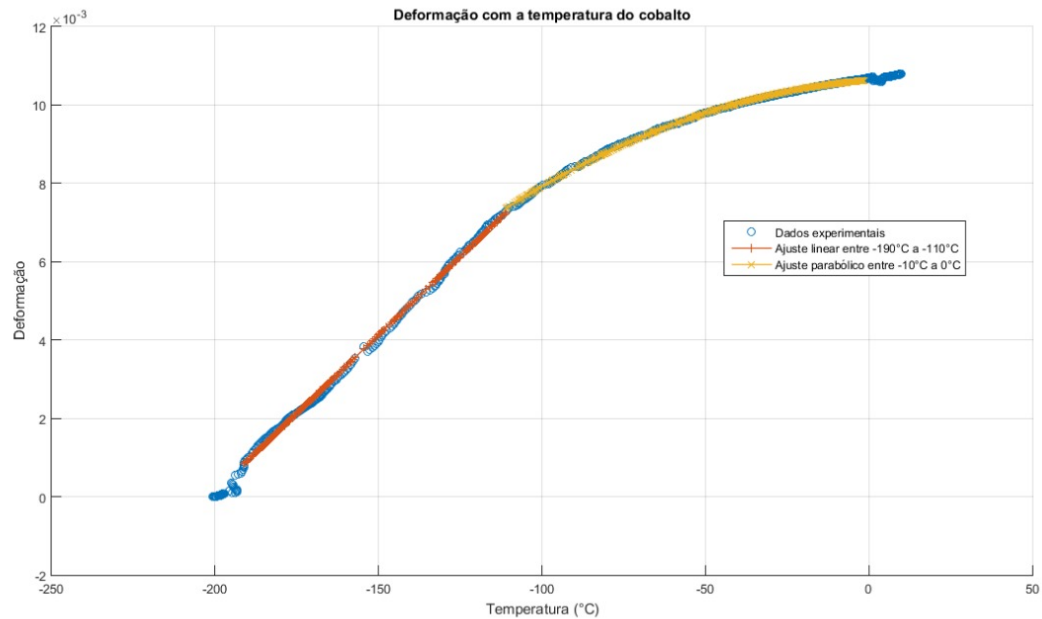
Pela Tabela 2, observa-se que o erro relativo para o segundo intervalo de temperatura foi bem pequeno, enquanto que para o primeiro foi considerável. Esperava-se, segundo os resultados de Kroeger e Swenson (1977), que α aumentasse à medida que a temperatura aumentasse. No entanto, a inclinação da curva diminui entre o primeiro e segundo intervalos de temperatura, mostrando o oposto.

Tal resultado pode ser justificado pelo fato de que a temperatura subiu de forma mais brusca para os intervalos mais baixos de temperatura, devido à grande diferença com a temperatura ambiente. É possível que isso tenha causado erros experimentais na medida, já que o sistema não entrava em equilíbrio.

4.2 Deformação *versus* temperatura do Cobalto

Os dados referentes à deformação com a temperatura para a amostra de Cobalto, bem como o ajuste linear, foram compilados no gráfico da Figura 5.

Como anteriormente, dividiu-se a curva em dois intervalos de temperatura. Para o intervalo de -190°C a -110°C , foi feito um ajuste linear dos pontos. Já para o intervalo de -110°C a 0°C , os dados foram ajustados com uma parábola. A fim de obter o valor de α , foi feita uma expansão em Taylor do polinômio de 2° grau e, assim, obteve-se o coeficiente linear. Os valores obtidos foram dispostos na Tabela 3.

Figura 5 – Gráfico de deformação *versus* temperatura do Cobalto

Fonte: autores

Tabela 3 – Coeficiente de dilatação térmica (α) experimental e teórico para o Cobalto

Intervalo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Correlação	α experimental (10^{-6} K^{-1})	α teórico* (10^{-6} K^{-1})	Erro relativo (%)
-190 a -110	0,9980	80,01	5 – 10	900
-110 a 0	0,9989	85,68	10 – 13	614

Fonte: autores, *Thurnay (1998)

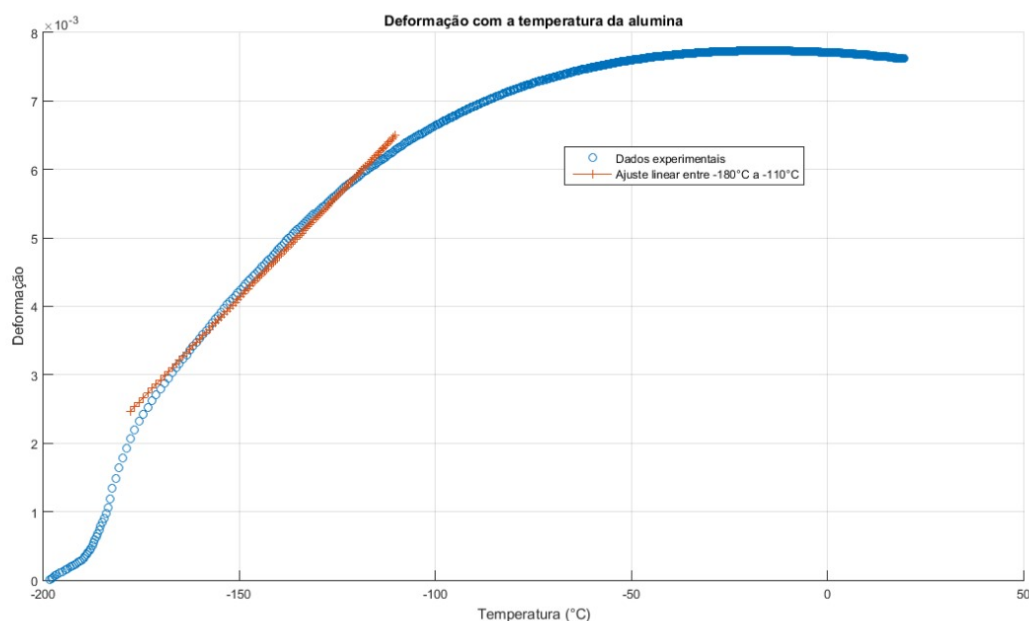
A Tabela 3 mostra erros relativos excessivamente altos. Tais erros foram calculados com o valor teórico médio para α no intervalo de temperatura considerado. Os valores obtidos experimentalmente também não são condizentes com os valores esperados para metais, em torno de $(5 - 25) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (CALLISTER; RETHWISCH, 2015).

Desta forma, é necessário considerar que houveram erros durante a medição da dilatação da amostra e também que a variação da temperatura não foi feita em regime quase-estático. Por terem condutividade térmica alta, espera-se que os metais entrem em equilíbrio mais rapidamente, embora o não-equilíbrio é o fator mais relevante para as imprecisões experimentais observadas.

4.3 Deformação *versus* temperatura da Alumina

Os dados referentes à deformação com a temperatura para a amostra de Alumina, bem como o ajuste linear, foram compilados no gráfico da Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de deformação *versus* temperatura da Alumina



Fonte: autores

A Tabela 4 mostra os resultados de α calculados, juntamente com a comparação com os valores encontrados na literatura.

Tabela 4 – Coeficiente de dilatação térmica (α) experimental e teórico para a Alumina

Intervalo de temperatura (°C)	Correlação	α experimental (10^{-6} K^{-1})	α teórico* (10^{-6} K^{-1})	Erro relativo (%)
-180 a -110	0,9996	59,6	8,1	635

Fonte: autores, *Accuratos (2013)

Devido à tendência a um coeficiente angular negativo a partir de -20°C , aproximadamente, não calculou-se α para intervalos de temperatura nessa faixa. Para o intervalo considerado, ainda assim, encontrou-se um erro relativo bastante alto, como visto na Tabela 4. Ao comparar-se o valor obtido com o valor esperado para o coeficiente de expansão térmica de cerâmicas, em torno de $(0,5 - 15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (CALLISTER;

RETHWISCH, 2015), conclui-se que o valor obtido está uma ordem de grandeza acima do esperado para essa classe de materiais.

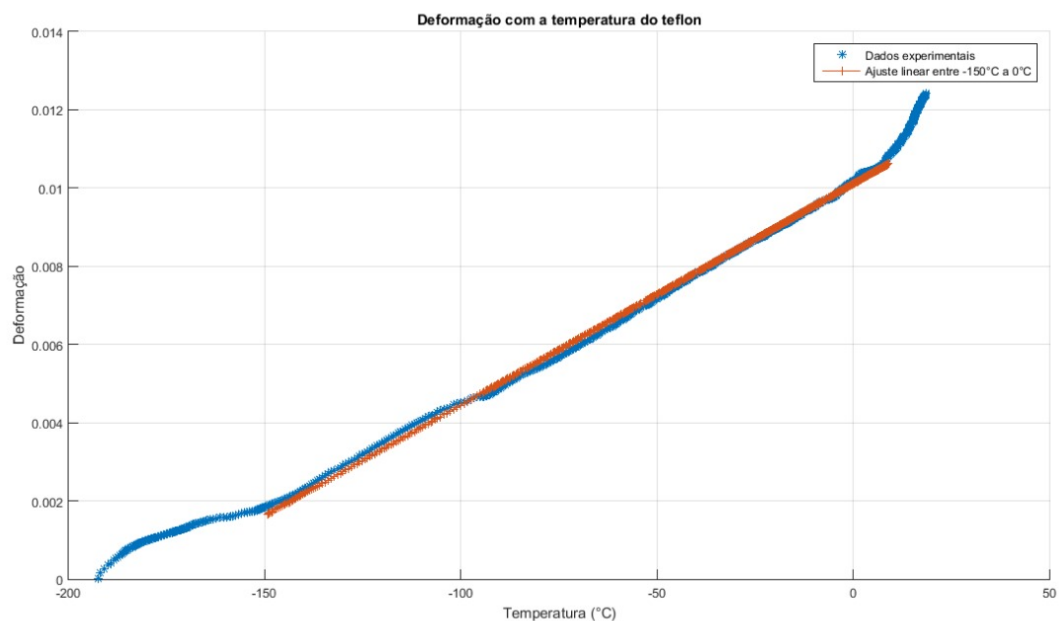
O gráfico da Figura 8 em Anexo A, mostra o comportamento da dilatação térmica da Alumina calculado de forma teórica por Wachtman, Scuderi e Cleek (1962), a partir da equação de Grüneisen (ver seção 4.5). Nesse gráfico, observa-se que a inclinação nunca é negativa. Além disso, percebe-se que o comportamento da curva obtida experimentalmente na Figura 6 é bastante diferente do comportamento apresentado na curva teórica da Figura 8.

Tal discrepância pode ser explicada pelo fato, novamente, de que o experimento não foi realizado no equilíbrio. Como a Alumina é um bom isolante térmico, o sensor do termopar, por ser metálico, entrou em equilíbrio térmico mais rapidamente que a amostra medida e, por isso, os dados medidos foram bastante imprecisos.

4.4 Deformação *versus* temperatura do Teflon[®]

Os dados referentes à deformação com a temperatura para a amostra de Teflon[®], bem como o ajuste linear, foram compilados no gráfico da Figura 7.

Figura 7 – Gráfico de deformação *versus* temperatura do Teflon[®]



Fonte: autores

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos e as comparações. Para este material, julgou-se que não seria necessário ajustar a curva em mais que um intervalo de

temperaturas.

Tabela 5 – Coeficiente de dilatação térmica (α) experimental e teórico para o Teflon®

Intervalo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Correlação	α experimental (10^{-6} K^{-1})	α teórico* (10^{-6} K^{-1})	Erro relativo (%)
-150 a 0	0,9983	56,6	96,0	41,1

Fonte: autores, *Dupont (2011)

Da Tabela 5, observa-se que o valor obtido experimentalmente para α possui a mesma ordem de grandeza do valor real da constante e, além disso, se encontra no intervalo esperado de coeficiente de expansão térmica de polímeros, em torno de $(50 - 400) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (CALLISTER; RETHWISCH, 2015). Apesar disso, o erro experimental apresentado foi bastante alto.

Considerando que o Teflon® não possui um coeficiente de condução térmica tão alto quanto de metais, também se considera que houve uma pequena diferença entre a temperatura registrada pelo termistor e a temperatura real da amostra.

No geral, pode ser inferido que todas as imprecisões na determinação do coeficiente de dilatação térmica são devidas ao método empregado no trabalho, com o uso do extensômetro, em detrimento dos demais métodos abordados na seção 2.1.2, que são bem mais acurados.

4.5 Cálculo do calor específico

A relação entre fônons e a expansão térmica de um material foi estabelecida por Grüneisen, cuja equação é expressa a seguir:

$$\alpha = \frac{\gamma c_V}{3B} \quad (4.2)$$

em que γ é o parâmetro de Grüneisen, c_V é o calor específico a volume constante do material e B é o módulo volumétrico ("*bulk modulus*").

A partir dos dados de coeficiente linear de dilatação térmica obtidos experimentalmente, seria possível determinar experimentalmente o valor do calor específico através da eq.(4.2). No entanto, devido à grande dificuldade de encontrar todos os valores de tais constantes da fórmula, não foi possível realizar esse cálculo.

5 Conclusão

Em culminância com os dados experimentais obtidos, foi possível determinar o coeficiente de dilatação linear das amostras analisadas pelo método utilizando o extensômetro. Destaca-se que o resultado foi satisfatório para a amostra de Alumínio, cujo erro relativo foi baixo, bem como a amostra de Teflon® ficou dentro da faixa esperada para materiais poliméricos.

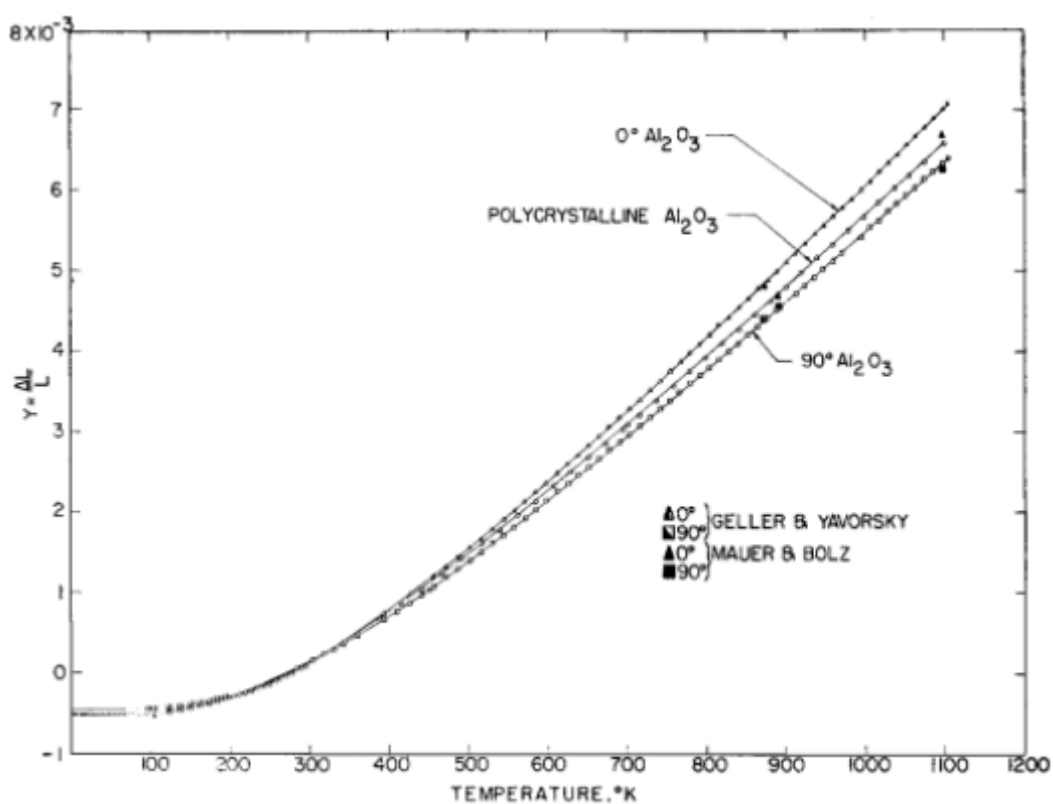
No que concerne às amostras de Alumina e Cobalto, foram obtidos valores experimentais discrepantes dos valores esperados para suas respectivas classes de materiais (cerâmica e metal) e os erros relativos à comparação com a literatura foram bastante altos.

As imprecisões do experimento podem ter origem, principalmente, no fato de que a variação de temperatura não foi feita de forma quase-estática, ou seja, não houve equilíbrio de temperaturas entre o termistor e as amostras. Esse fato é relevante principalmente para a Alumina, que é um isolante e, portanto, não variava sua temperatura tão facilmente quanto o termorresistor. Outro fator decisivo para a baixa acurácia é o uso do extensômetro como método para determinação de expansão térmica.

Adicionalmente, o trabalho foi importante para entender as propriedades termomecânicas de vários tipos de materiais, conhecer os processos de expansão térmica e os métodos associados à medição de dilatação.

Anexo A: Deformação *versus* temperatura a partir do cálculo da equação de Grüneisen para a Alumina

Figura 8 – Gráfico de deformação *versus* temperatura a partir do cálculo da equação de Grüneisen para a Alumina

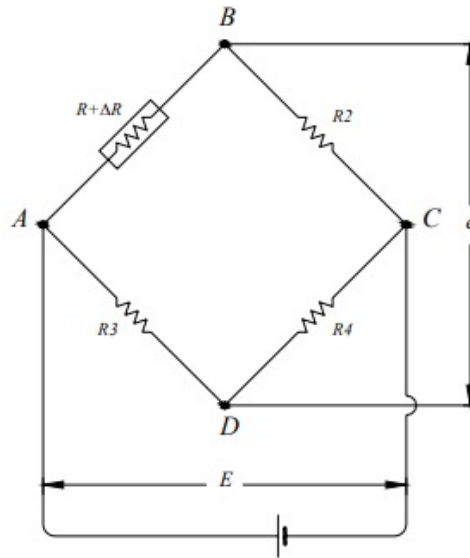


Fonte: Wachtman, Scuderi e Cleek (1962)

Apêndice: Ponte de Wheatstone

O princípio de medição do extensômetro é baseado no circuito conhecido por ponte de Wheatstone, como pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Ponte de Wheatstone



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004)

Para dois resistores em série, a tensão aplicada a eles, visualizada na Figura 10, é dada por:

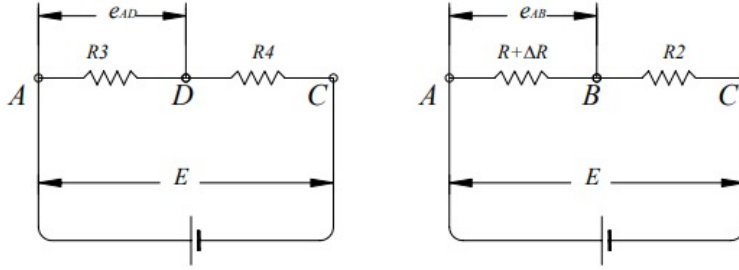
$$e_{AD} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \cdot E \quad (5.1)$$

Analogamente, a tensão entre A e B, mostrada também na Figura 10, é dada por:

$$e_{AB} = \left[\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] \cdot E \quad (5.2)$$

Pondo os dois circuitos indicados na Figura 10 em paralelo, obtém-se a ponte de Wheatstone indicada na Figura 9, em que a diferença de potencial entre os pontos D e B é expressa por $e_{AD} - e_{AB}$. Assumindo R a resistência do extensômetro e R_2 , R_3 , R_4 resistores fixos e E uma voltagem aplicada ao sistema, tem-se que, caso o extensômetro

Figura 10 – Circuito de resistores em série



Fonte: Andolfato, Camacho e Brito (2004)

sofra uma deformação e a resistência se altere para $R + \Delta R$, uma voltagem elétrica e gerada nos terminais de saída da ponte será dada por:

$$e = e_{AD} - e_{AB} = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_2} \right] \cdot E \quad (5.3)$$

Se $R = R_2 = R_3 = R_4$ ("ponte equilibrada"), a eq.(5.3), pode ser escrita como:

$$e = \left[\frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)} \right] \cdot E \quad (5.4)$$

Tendo em vista que $2R \gg \Delta R$, tem-se que:

$$e \approx \frac{E}{4R} \frac{\Delta R}{R} \quad (5.5)$$

A eq.(5.5) mostra que a tensão possui relação com a variação relativa da resistência. Sabendo que a relação entre variação de resistência e deformação é dada pela eq.2.8, a eq.(5.5) pode ser escrita em função da deformação como:

$$e \approx \frac{E}{4R} \cdot K \cdot \varepsilon \quad (5.6)$$

Referências

- Accuratos. *Aluminum Oxide Ceramic Properties*. 2013. Disponível em: <<https://accuratus.com/alumox.html>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- ALMEIDA, C. P. de. *Sequência didática para ensino de dilatação térmica através de experimentos demonstrativos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2016. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/4223/1/Celso%20Ponchio%20-%20Dissertacao%20final.pdf>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. de. *Extensimetria Básica*. 2004. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>>.
- C-Therm Technologies. *What is Coefficient of Thermal Expansion (CTE)? How do I measure it?* 2019. Disponível em: <https://ctherm.com/resources/blog/what_is_coefficient_of_thermal_expansion_cte_how_do_i_measure_it/>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CARDOSO, R. da S. et al. *Resistividade em função da temperatura de condutores de Cu, Fe e Nb e semicondutor de Si*. 2019.
- COSTA, V. *Ligações químicas*. 2016. Disponível em: <<http://www.cmr.poli.usp.br/resumos/QFL2129%20-%20Liga%C3%A7%C3%B5es%20qu%C3%ADmicas.pdf>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- Dupont. *Teflon PTFE Properties Handbook*. 2011. Disponível em: <http://www.rjchase.com/ptfe_handbook.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- GIROTTI, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica dc em sólidos: como efetua-las corretamente. *Quim. Nova*, v. 25, n. 4, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/qn/v25n4/10539.pdf>>.
- GONÇALVES, L. J. *Dilatação térmica*. 2004. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/cref/leila/dilata.htm>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- KROEGER, F. R.; SWENSON, C. A. Absolute linear thermal-expansion measurements on copper and aluminum from 5 to 320 K. *Journal Of Applied Physics*, v. 48, p. 853, 1977. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.323746>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- PARENTE, E. *Termistores - NTC*. 2000. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/brenno/index.html>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.
- SANO, M. A. *Síntese e Caracterização de Óxidos com Baixa Expansão Térmica*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11333@1>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.

THURNAY, K. *Thermal Properties of Transition Metals*. 1998. Disponível em: <<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/270043419/3834203>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.

WACHTMAN, J. B.; SCUDERI, T. G.; CLEEK, G. W. Linear Thermal Expansion of Aluminum Oxide and Thorium Oxide from 100 K to 1100 K. *Journal Of The American Ceramic Society*, v. 45, n. 7, p. 319–323, 1962. Disponível em: <<https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11159.x>>. Acesso em: 20 de junho de 2019.