

# Laboratórios de Física

---

Física Aplicada – Lic. Eng. Informática

## ***Expansão térmica e lei do arrefecimento de Newton***

## Objetivos

*Com a realização deste trabalho experimental pretende-se determinar o coeficiente de expansão linear dos materiais disponíveis (aço e alumínio) e a constante de tempo de arrefecimento para cada um dos materiais.*

## Introdução Teórica

### Expansão térmica

Para a maioria dos sólidos, líquidos e gases, quando sujeito a uma fonte térmica, que promova um aumento de temperatura, o comprimento, a superfície ou o volume aumentam. Este fenómeno, também conhecido como expansão (ou dilatação) térmica, corresponde, do ponto de vista microscópico, a um aumento da separação média entre os átomos (ou moléculas) que constituem as substâncias. A expansão térmica não é mais do que o aumento do espaço interatômico médio do material.

Considerando um corpo sólido, com um comprimento inicial de  $l_0$ , e sujeito a uma variação de comprimento  $\Delta l$ , este é proporcional a  $l_0$  para uma variação de temperatura,  $\Delta T$ , considerada pequena, para pequenas secções do material. Assim, podemos escrever:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 1})$$

onde  $\alpha$  é a constante de proporcionalidade denominada coeficiente de expansão linear.

Embora  $\alpha$  varie de uma forma geral com a temperatura, esta variação pode ser desprezada quando a temperatura de trabalho não se aproximar do ponto de fusão do sólido. Assim, se  $l_T$  é o comprimento do sólido à temperatura  $T$  e  $l_0$  o comprimento à temperatura  $T_0$ , podemos escrever a equação anterior da seguinte forma:

$$l_T = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (\text{Eq. 2})$$

Para sólidos anisotrópicos, ou seja, aqueles cujas propriedades variam com a direção, como é o caso de alguns cristais, o coeficiente de expansão linear assume valores diferentes em direções diferentes.

Para sólidos isotrópicos, o coeficiente de expansão linear é independente da direção, como exemplo os materiais da tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de expansão térmica lineares

Material	$\alpha / \times 10^{-5} K^{-1}$
Alumino	2,4
Latão	2,0
Cobre	1,7
Vidro	0,4 – 0,9
Aço	1,2
Quartzo (fundido)	0,04
Invar (liga de ferro-níquel)	0,09

### Arrefecimento

O calor é uma modalidade de energia em trânsito que se transfere de um corpo de temperatura mais alta para um corpo de temperatura mais baixa. A transmissão de calor pode-se dar por três modos: condução, convecção e radiação. Embora predomine um dos modos de transmissão, normalmente eles estão associados.

Na condução, a energia é transmitida por meio de impactos moleculares, sem um apreciável deslocamento das moléculas, e pelo deslocamento dos elétrons livres das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura.

Na convecção, a transferência de energia dá-se por meio do movimento do fluido.

Na radiação, a energia é transferida através de ondas eletromagnéticas. Para temperaturas próximas do ambiente, a transmissão por radiação pode ser desprezada.

Quando o fluxo de calor é constante, ou seja, não depende do tempo e a temperatura de cada ponto permanece constante, o regime de transmissão de calor é chamado de permanente ou estacionário.

A relação para o fluxo de calor unidimensional através de um dado elemento é dada pela seguinte equação diferencial (equação de Fourier):

$$q = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

- $k$  é a condutividade térmica do material. Ela depende fundamentalmente da natureza do material, do seu estado de agregação e da temperatura;
- $A$  é a área da secção através da qual o calor flui, área esta medida perpendicularmente à direção do fluxo;
- $dT/dx$  é o gradiente de temperatura na secção, isto é, a razão da variação da temperatura com a distância ( $x$ ) na direção do fluxo de calor.

O sinal negativo foi introduzido na equação para indicar que a transmissão de calor se dá no sentido do  $dx$  positivos e no sentido das temperaturas decrescentes.

Na vizinhança imediata da parede do sólido, o calor somente pode fluir por condução porque as partículas são consideradas estacionárias em relação à parede. Assim, todo o calor transmitido para o ambiente por convecção passará antes pela camada “fronteira”. A equação que nos dará o fluxo por essa camada fronteira será:

$$q = \frac{dQ}{dt} = -\frac{k}{\Delta x} \cdot A \cdot \Delta T = -h \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo  $h$ , o coeficiente de transferência de calor por convecção, e o seu valor depende das propriedades físicas, da velocidade do fluido, da forma, da natureza, da rugosidade da superfície e do tipo de escoamento.

O coeficiente  $h$  mede o efeito global da transmissão de calor por convecção, em função do grande número de variáveis e da pequena espessura ( $x$ ) da camada fronteira.

Consideremos um corpo a uma temperatura inicial  $T_i$  e o meio ambiente a uma temperatura  $T_a$ . Estando o corpo a uma temperatura maior do que a do meio ambiente, este cederá ao meio uma determinada quantidade de calor. Num intervalo de tempo infinitesimal  $dt$ , a quantidade de calor cedida será:

$$dQ = -m \cdot c \cdot dT \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde  $m$ , é a massa do sólido e  $c$  a capacidade térmica mássica do mesmo. O calor cedido pelo corpo será transmitido ao meio ambiente por convecção. No intervalo de tempo  $dt$ , a quantidade de calor transmitida será dada pela expressão:

$$dQ = -h \cdot A \cdot (T_a - T) \cdot dt \quad (\text{Eq. 6})$$

obtida através da Eq. 4. Determinando o balanço energético no mesmo intervalo de tempo  $dt$ , temos:

$$m \cdot c \cdot dT = h \cdot A \cdot (T - T_a) \cdot dt \quad (\text{Eq. 7})$$

Reescrevendo a equação anterior temos a seguinte equação diferencial:

$$\frac{1}{(T - T_a)} dT = \frac{h \cdot A}{m \cdot c} \cdot dt \quad (\text{Eq. 8})$$

Quando  $t = 0$ ,  $T = T_i$ , a solução da equação anterior será:

$$T - T_a = (T_i - T_a)e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c} t} \quad (\text{Eq. 9})$$

Ou da seguinte forma (Lei de Newton),

$$T - T_a = (T_i - T_a)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde a constante  $\tau$ , que apresenta as dimensões de tempo, à qual dá-se o nome de **constante de tempo** de arrefecimento do material. Podendo ser dada pela expressão:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{h \cdot A} \quad (\text{Eq. 11})$$

A última equação descreve a variação da temperatura do corpo com o tempo, durante o arrefecimento do corpo. Ela é semelhante à equação da tensão elétrica de um condensador quando este se encontra em descarga.

O gráfico representativo da equação é:

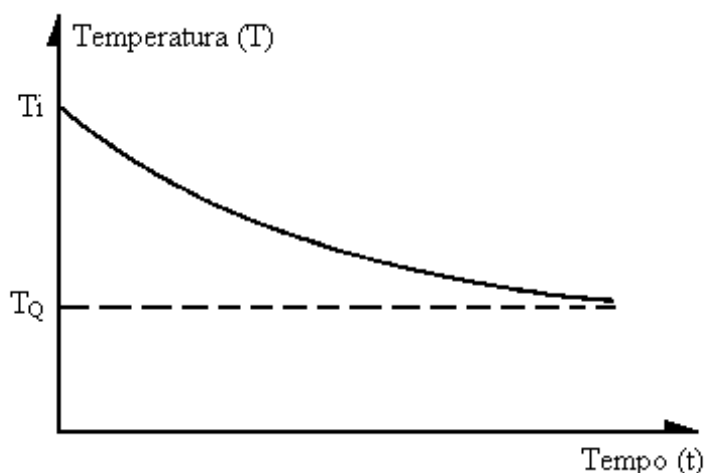


Figura 1. Curva de arrefecimento.

Observe que, após um tempo  $t = \frac{m \cdot c}{h \cdot A}$ , a diferença de temperatura cai para 36,8% do seu valor inicial, e tende a zero, exponencialmente.

### Material Necessário

- 1 lamparina;
- 1 barra de alumínio,  
(comprimento =  $23,90 \pm 0,05$  cm, diâmetro =  $0,618 \pm 0,002$  cm e massa =  $19 \pm 1$  g)
- 1 barra de aço  
(comprimento =  $23,95 \pm 0,05$  cm, diâmetro =  $0,618 \pm 0,002$  cm e massa =  $55 \pm 1$  g)
- 1 termopar tipo K e leitor (sensibilidade de  $0,1$  °C);
- 1 cronómetro;
- 1 comparador micrométrico (sensibilidade de  $0,01$  mm);
- 1 régua graduada, ou fita métrica.

### Procedimento

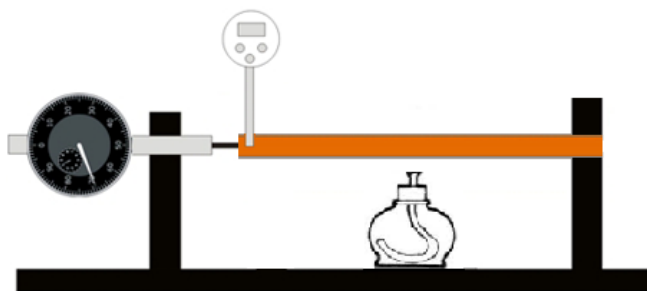
#### **Expansão térmica: Aquecimento**

- 1 Implemente a montagem esquematizada na figura 2.
- 2 Inicie com uma das barras, de aço ou alumínio.
- 3 Coloque a “zero” o comparador micrométrico.
- 4 Prepare o cronómetro.
- 5 Meça a temperatura a que se encontra a barra antes de lhe fornecer calor.
- 6 Ligue a lamparina e espere que a chama estabilize antes de a colocar (aprox. 30 s.)
- 7 **Os registos de temperatura, tempo e expansão linear devem ser feitos no mesmo instante.**
- 8 Coloque a lamparina por debaixo da barra em estudo a 11 cm da extremidade fixa, inicialize o cronómetro.

- 9 Registe a temperatura e o tempo para cada 0,04 mm de expansão que se observe no contador micrométrico.
- 10 Quando o micrómetro demorar mais de um minuto a alterar o seu valor, significa que a expansão está no seu limite (para esta barra e nestas condições), e assim pode-se parar de registar os valores.

**Início do arrefecimento:**

- 11 Antes de remover a lamparina, preparar o cronómetro de forma a ser inicializado quando a remover.
- 12 Construa uma tabela com três colunas. Sendo uma para o tempo.
  - 12.1 Na segunda coluna registe os valores da temperatura em intervalos de tempo de 10 em 10 segundos, até que a barra chegue, aproximadamente, à temperatura inicial.
  - 12.2 Na terceira coluna, os valores do contador micrométrico, nos mesmos intervalos de tempo (10 em 10 s) até que a barra chegue, aproximadamente, à temperatura inicial.
- 13 Repita todo o processo para a outra barra metálica (alumínio/aço). Por forma a obter os valores de expansão e arrefecimentos para os dois materiais.



**Figura 2. Montagem experimental**

**Análise e tratamento de dados e QUESTÕES sobre a experiência**

1. Represente graficamente as medidas obtidas no aquecimento (expansão térmica) para uma das barras. Representando a expansão térmica em função da temperatura.
2. Represente num segundo gráfico, o arrefecimento da barra utilizada no ponto anterior. Representando a temperatura em função do tempo.
3. Repita os dois pontos anteriores, agora para a outra barra.
4. Identifique as “zonas” de interesse nos gráficos, para a realização dos cálculos.
  - Nos gráficos do aquecimento, a zona de interesse, é a zona com um comportamento linear, antes de atingir a estabilização da expansão. Isolar essa zona e colocar uma linha de tendência, obtendo a equação e o coeficiente de correlação.
  - Nos gráficos do arrefecimento, da temperatura em função do tempo, a zona de interesse é todo o conjunto de pares de valores, quando a temperatura inicia o decréscimo. Neste caso o ajuste é uma função exponencial, obedecendo à Lei de Newton para o arrefecimento.

5. Realize os melhores ajustes aos valores experimentais, de acordo com as zonas identificadas anteriormente, e para cada situação.
6. Determine as grandezas físicas referidas nos objetivos (**coeficiente de expansão linear** e **constante de tempo de arrefecimento**) usando os valores da análise gráfica.
7. Pesquisar os valores tabelados para o coeficiente de expansão linear do aço e do alumínio e compare com os valores obtidos pela análise gráfica.
8. Sabendo a massa, a capacidade térmica mássica e a superfície em contacto com o ar das barras metálicas, estime o coeficiente de transferência de calor por convecção através da constante de tempo obtida graficamente, no processo de arrefecimento de cada material.

**Nota 1** - Esta análise gráfica deve ser feita preferencialmente em suporte informático, recorrendo para isso ao *Microsoft Excel*.

**Nota 2** – Todas as grandezas físicas calculadas devem ser apresentadas com os algarismos significativos corretos, assim como, as suas unidades SI e ainda as incertezas absolutas e relativas das mesmas.

**Questão 1** – No processo de aquecimento, a camada de ar envolvente às barras influencia no valor alcançado para a expansão máxima obtida, quer para a barra de Aço quer para a de Alumínio. Sendo a afirmação verdadeira, ou falsa, dê uma justificação.

**Questão 2** – No caso da barra de Aço, por exemplo, verifica-se que nos instantes logo a seguir a retirar a fonte de calor (lâmparina), a temperatura no ponto em que se encontra o sensor tende a aumentar ligeiramente, porquê?

**Questão 3** – Represente num mesmo gráfico o comportamento da expansão térmica em função da temperatura, obtida no aquecimento e no arrefecimento para o mesmo material. Qual a razão para que as curvas não se sobreponham? A curva obtida no aquecimento com a curva obtida no arrefecimento.

## **Bibliografia**

- HOLMAN, J. P. Transferência de calor. São Paulo: McGraw-Hill, 1983.
- ZEMANSKY, W. M. Calor e termodinâmica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- Paul A. Tipler, Gene Mosca. Physics for Scientists and Engineers, Sixth Edition, W. H. Freeman and Company, 2008.