

Licenciatura em Engenharia Informática

FSIAP – 2020/2021

Relatório Final

Expansão Térmica e Lei do Arrefecimento de Newton

Autores:

1191072 Teresa Pereira Leite

1191507 Bárbara Pinto

Turma: 2DL **Grupo:** 03

Data: 19/12/20

Docente: JLL

Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar o fenómeno de aquecimento e arrefecimento de metais, analisando a expansão térmica, ou seja, a variação do comprimento de barras de metal quando submetidas a uma fonte de calor.

A metodologia da experiência consistiu na visualização de quatro vídeos relativos ao aquecimento e arrefecimento de duas barras de metais e no registo em certos intervalos de tempo dos valores da temperatura e da expansão térmica.

Para a análise dos resultados recorremos a gráficos para representar os comportamentos de aquecimento e arrefecimento dos materiais, retirando os pontos anómalos nos limites do intervalo de registos da experiência, o que resultou em “zonas de interesse”. A partir dessas zonas foram feitas regressões exponenciais e lineares para todos os cálculos subjacentes.

Destes cálculos chegamos aos resultados de que o coeficiente de transmissão de calor por convecção está no intervalo de 21 a 23 $W/m^2 \cdot K$ e que o coeficiente de expansão linear para a barra de aço foi $1,7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e para a barra de alumínio foi $2,1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A constante de tempo de arrefecimento foi menor para o alumínio do que para o aço.

Concluimos que os resultados estavam dentro dos valores teóricos esperados e que as propriedades dos processos de convecção e condução se verificaram ao longo da experiência.

Introdução

O presente trabalho foi realizado com o intuito de estudar o fenómeno de aquecimento e arrefecimento, associado à expansão térmica. Os objetivos principais consistiam em: determinar o coeficiente de expansão linear dos materiais disponíveis (aço e alumínio) e a constante de tempo de arrefecimento para cada um dos materiais.

Para atingir estes objetivos tornou-se necessário entender e aplicar alguns conceitos básicos, nomeadamente o conceito de calor, definido como “a transferência de energia devido a uma diferença de temperatura” (Mosca & Tipler, p. 674).

Esta transferência de energia pode ser realizada através de três processos distintos (que muitas vezes acontecem em simultâneo):

1. Condução: Transferência de calor através de um material condutor. As moléculas de uma região do material recebem calor e passam a vibrar com maior intensidade. A agitação é transmitida molécula a molécula.
2. Convecção: Transferência de calor por meio de movimento de um fluido. De um modo geral, as alterações de densidade do fluido - como consequência do seu aquecimento ou arrefecimento - permitem a circulação e movimentação do mesmo, transportando consigo a energia (calor).
3. Radiação: Transferência de calor sob a forma de ondas eletromagnéticas que se movem à velocidade da luz. Este processo não será abordado no presente trabalho, uma vez que se considera que para temperaturas próximas do ambiente, a transmissão por radiação pode ser desprezada.

Apresentamos de seguida uma breve explicação acerca dos fatores mais importantes para os cálculos experimentais conduzidos, nomeadamente os que constam nos objetivos do trabalho.

Capacidade térmica mássica

A quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um material é proporcional à variação da temperatura e à massa do material, o que se traduz em:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

onde:

Q – quantidade de energia transferida (J)

m – massa da substância (kg)

c – capacidade térmica mássica ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) ou ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)

ΔT – variação de temperatura ocorrida na substância (K ou $^\circ C$)

A capacidade térmica mássica é a quantidade de energia que é necessário fornecer para que a temperatura de uma unidade de massa aumente em uma unidade (por exemplo, para que 1 kg do material aumente a sua temperatura em 1 K).

Uma vez que no contexto da experiência não nos era possível obter o valor de Q , recorremos a valores tabelados (teóricos), que podem não ser uma correspondência fiel aos materiais utilizados (existem vários tipos do mesmo metal). Por essa razão, escolhemos destacar aqui o fundamento por trás dos valores utilizados.

Coeficiente de expansão linear

Quando a temperatura de um objeto aumenta, verifica-se que o objeto expande, sendo essa expansão (a variação do comprimento face ao comprimento original) proporcional à variação da temperatura, ou seja:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \text{ ou } \Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

onde:

ΔL – variação do comprimento (m) do objeto face ao comprimento inicial

L_0 – comprimento inicial (m) do objeto

α – coeficiente de expansão linear ($^\circ C^{-1}$)

ΔT – variação da temperatura ($^\circ C$) face à temperatura ambiente

O coeficiente de expansão linear representa a proporcionalidade entre a variação de comprimento fracionária e a variação da temperatura. A tendência de expansão do material quando sujeito a um aumento de temperatura é tanto maior quanto maior for o α .

Coeficiente de transferência de calor por convecção

De acordo com a Lei de Arrefecimento de Newton, “durante todos os processos de transferência de calor, a taxa de arrefecimento de um objeto é aproximadamente proporcional à diferença de temperatura entre o objeto e o seu ambiente.” (Mosca & Tipler, p. 675).

Adicionalmente, no caso da convecção, o calor transferido por um objeto para o ambiente é aproximadamente proporcional à área do objeto e à diferença de temperatura.

Esta lógica traduz-se para a seguinte equação, derivada da lei de Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = -h \cdot A \cdot \Delta T$$

onde:

dQ – entrada ou perda de calor (J)

dt – intervalo de tempo (s)

h – coeficiente de transferência de calor por convecção ($W m^{-2} K^{-1}$)

A – área de superfície de transferência térmica (m^2)

ΔT – diferença de temperatura entre a área de superfície do objeto e a temperatura ambiente ($^{\circ}C$ ou K)

O coeficiente de transferência de calor por convecção mede o efeito global da transmissão de calor por convecção, em função das propriedades físicas, da velocidade do fluido, da forma, da natureza, da rugosidade da superfície, do tipo de escoamento e da espessura da camada fronteira – camada pela qual passa o calor transmitido para o ambiente por convecção, antes de iniciar o processo de condução assim que atinge a parede do sólido.

Aplicado à lei de Newton $T - T_a = (T_i - T_a)e^{-\frac{t}{\tau}}$, o coeficiente de transferência de calor surge como uma das componentes para o cálculo da constante de tempo de arrefecimento do material:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{h \cdot A}$$

onde:

τ – constante de tempo de arrefecimento (s)

m – massa da substância (kg)

c – capacidade térmica mássica ($J kg^{-1} K^{-1}$) ou ($J kg^{-1} ^{\circ}C^{-1}$)

h – coeficiente de transferência de calor por convecção ($W m^{-2} K^{-1}$)

A – área de superfície de transferência térmica (m^2)

A constante de tempo de arrefecimento é, tal como o nome indica, o tempo necessário para um dado material atingir uma temperatura estável (a temperatura ambiente) após ser sujeito a um aquecimento.

Procedimento e Resultados Experimentais

O procedimento experimental consistiu em observar a montagem de uma barra de metal (a experiência foi repetida com dois tipos de material – aço e alumínio) sobre uma lamparina ligada, controlando – com recurso a equipamentos como um termopar, um cronómetro e um comparador micrométrico –, a temperatura da barra, a sua expansão física com o calor e o tempo decorrido. Após se verificar a estabilização do valor lido no micrómetro (ou seja, a barra atingir a expansão máxima), seguiu-se a segunda parte da experiência, retirando-se a lamparina e observando-se o processo de arrefecimento, controlando os mesmos parâmetros, até que a barra atingisse aproximadamente a temperatura inicial.

Apresentamos abaixo o quadro com as dimensões físicas de ambas as barras utilizadas na experiência e consideradas nos cálculos ao longo deste relatório:

	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)	Massa (g)
Aço	$23,95 \pm 0,05$	$0,618 \pm 0,002$	55 ± 1
Alumínio	$23,90 \pm 0,05$	$0,618 \pm 0,002$	19 ± 1

Tabela 1: Dimensões físicas das barras de aço e alumínio

De seguida, representamos os valores da temperatura e expansão ao longo de cada parte da experiência – aquecimento e arrefecimento – e para cada uma das barras utilizadas – aço e alumínio:

Tempo (s)	Expansão (mm)	Temperatura (°C)
0	0,00	22,7
9	0,04	22,7
23	0,08	22,7
39	0,12	23,0
56	0,16	24,3
73	0,20	26,7
97	0,24	32,5
120	0,28	39,2
145	0,32	48,1
177	0,36	59,3
212	0,40	70,5
266	0,44	84,9

Tabela 2: Aquecimento (expansão térmica) da barra de aço

Tempo (s)	Expansão (mm)	Temperatura (°C)
0	0,50	111,2
10	0,47	112,4
20	0,45	113,2
30	0,42	114,1
40	0,40	114,8
50	0,38	115,3
60	0,36	115,6
70	0,35	115,6
80	0,33	115,3
90	0,32	114,7
100	0,30	113,7
110	0,29	112,4
120	0,27	110,9
130	0,26	109,1
140	0,25	107,2
150	0,24	105,2
160	0,23	103,2

170	0,22	101,1
180	0,21	99,0
190	0,20	96,7
200	0,19	94,5
210	0,18	92,4
220	0,18	90,3
230	0,17	88,2
240	0,16	86,0
250	0,16	84,0
260	0,15	82,0
270	0,14	79,9
280	0,14	78,1
290	0,13	76,2
300	0,13	74,4
310	0,12	72,7
320	0,12	71,0
330	0,11	69,2
340	0,11	67,7
350	0,10	66,1

360	0,10	64,5
370	0,10	63,1
380	0,09	61,7
390	0,09	60,2
400	0,09	59,1
410	0,08	57,8
420	0,08	56,5
430	0,08	55,4
440	0,07	54,1
450	0,07	53,1
460	0,07	52,1
470	0,06	51,1
480	0,06	50,0
490	0,06	49,1
500	0,06	48,0
510	0,06	47,3
520	0,05	46,3
530	0,05	45,6
540	0,05	44,9
550	0,05	44,0
560	0,05	43,4
570	0,04	42,6
580	0,04	42,0
590	0,04	41,3
600	0,04	40,6
610	0,04	39,9
620	0,04	39,3
630	0,04	38,7
640	0,04	38,2
650	0,03	37,6
660	0,03	37,1
670	0,03	36,6
680	0,03	36,1
690	0,03	35,7
700	0,03	35,2
710	0,03	34,8
720	0,03	34,4
730	0,03	34,0
740	0,03	33,6
750	0,02	33,2
760	0,02	32,9
770	0,02	32,5
780	0,02	32,2
790	0,02	31,9
800	0,02	31,6

810	0,02	31,3
820	0,02	31,0
830	0,02	30,7
840	0,02	30,4
850	0,02	30,1
860	0,02	29,9
870	0,02	29,6
880	0,01	29,4
890	0,01	29,1
900	0,01	29,0
910	0,01	28,7
920	0,01	28,5
930	0,01	28,3
940	0,01	28,1
950	0,01	27,9
960	0,01	27,8
970	0,01	27,6
980	0,01	27,4
990	0,01	27,3
1000	0,01	27,1
1010	0,01	26,9
1020	0,01	26,8
1030	0,01	26,6
1040	0,01	26,5
1050	0,01	26,3
1060	0,01	26,2
1070	0,01	26,0
1080	0,01	25,9
1090	0,01	25,8
1100	0,01	25,7
1110	0,01	25,6
1120	0,01	25,5
1130	0,01	25,4
1140	0,01	25,3
1150	0,01	25,2
1160	0,01	25,1
1170	0,01	25,0
1180	0,01	24,9
1190	0,01	24,8
1200	0,01	24,8
1210	0,01	24,7
1220	0,01	24,6
1230	0,01	24,6
1240	0,01	24,4
1250	0,01	24,4

1260	0,01	24,3
------	------	------

Tabela 3: Arrefecimento da barra de aço

Para os efeitos de cálculo relacionados com a barra de aço, iremos considerar a temperatura ambiente igual a 22,7°C, correspondente ao valor registado no início do procedimento experimental.

Tempo (s)	Expansão (m)	Temperatura (°C)
0	0	16,8
9	0,00004	17
14	0,00008	18,8
20	0,00012	21,5
25	0,00016	25,8
31	0,0002	31
38	0,00024	37,7
45	0,00028	45,7
52	0,00032	52,6
58	0,00036	58,1
64	0,0004	64,7
71	0,00044	72,2
79	0,00048	80,1
89	0,00052	89,4
100	0,00056	99,4
111	0,0006	107,6
122	0,00064	114,8
133	0,00068	121,5
144	0,00072	129,4

Tabela 4: Aquecimento da barra de alumínio

Tempo (s)	Expansão (mm)	Temperatura (°C)
0	0,68	135,5
10	0,63	133,8
20	0,57	132,1
30	0,52	127,4
40	0,48	121,9
50	0,44	114,9
60	0,44	108,1
70	0,37	101
80	0,34	95,4
90	0,31	89,5
100	0,28	83,8
110	0,26	79,3
120	0,24	75,1
130	0,23	71,1
140	0,21	67,2

150	0,19	63,5
160	0,18	60,4
170	0,16	57,6
180	0,15	54,8
190	0,14	52,2
200	0,13	49,7
210	0,12	47,7
220	0,11	45,7
230	0,1	43,7
240	0,09	41,9
250	0,08	40,3
260	0,08	38,6
270	0,07	37,2
280	0,06	35,6
290	0,06	34,5
300	0,05	33,3
310	0,05	32,4

320	0,05	31,4
330	0,04	30,5
340	0,04	29,8
350	0,03	29
360	0,03	28,3
370	0,03	27,7
380	0,03	27,2
390	0,02	26,6
400	0,02	26,2
410	0,02	25,6
420	0,02	25,1
430	0,01	24,7

440	0,01	24,2
450	0,01	23,9
460	0,01	23,5
470	0,01	23,2
480	0	22,9
490	0	22,5
500	0	22,2
510	0	22
520	0	21,8
530	0	21,6
540	0	21,3

Tabela 5: Arrefecimento da barra de alumínio

Apresentação dos Resultados

1 - Aquecimento

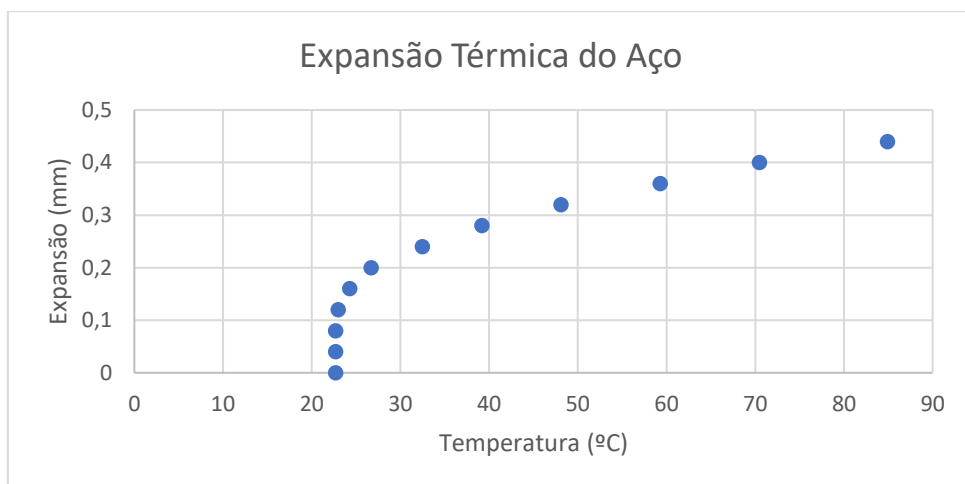


Gráfico 1: Expansão térmica da barra de aço em função da temperatura

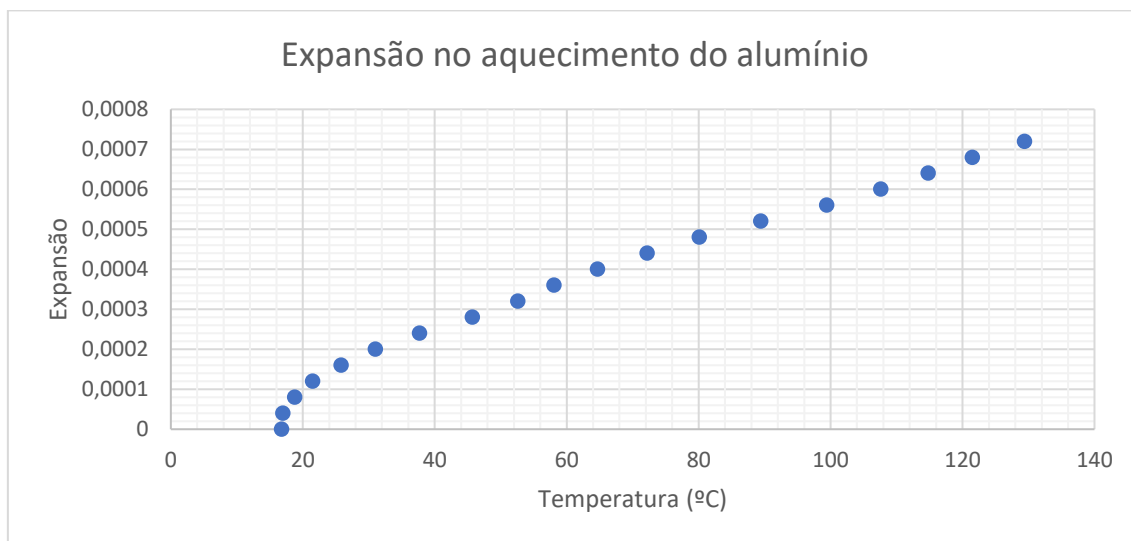


Gráfico 2: Expansão térmica da barra de alumínio em função da temperatura

2 – Arrefecimento

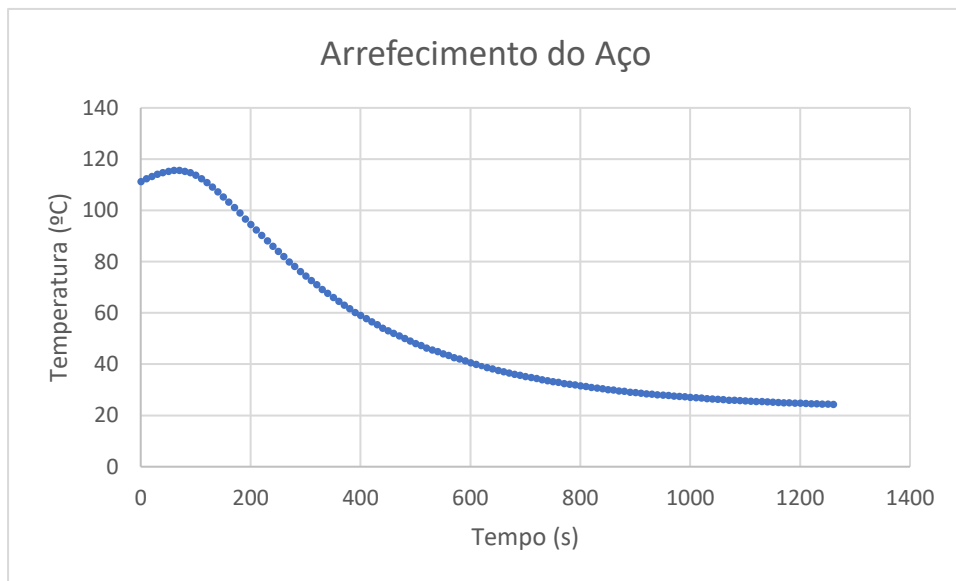


Gráfico 3: Arrefecimento da barra de aço em função do tempo

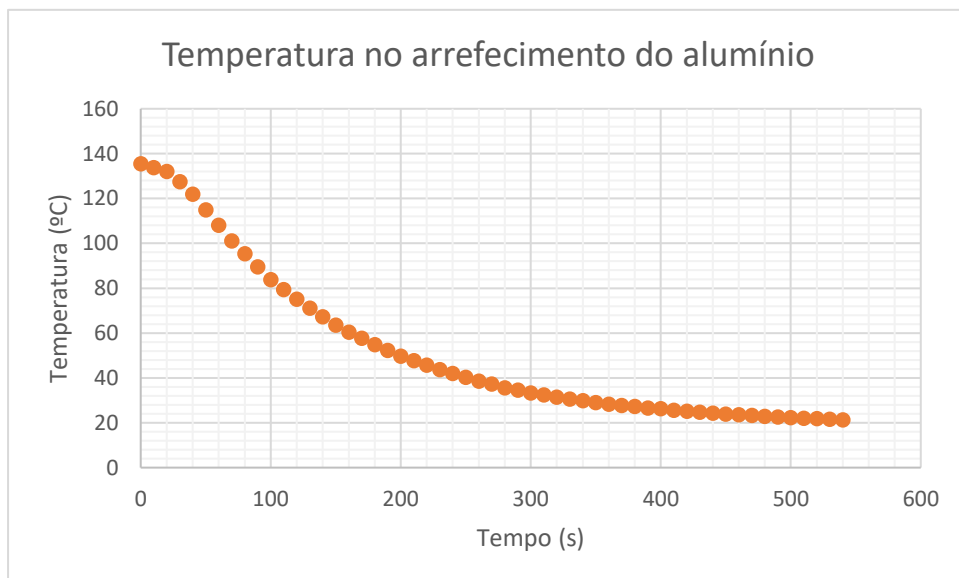


Gráfico 4: Arrefecimento da barra de alumínio em função do tempo

3 – Zonas de interesse

Observou-se que a zona no gráfico de aquecimento da barra de aço onde existe um comportamento linear e que maximiza o coeficiente de correlação é compreendida entre os momentos de tempo 97s e 212s.

Abaixo encontra-se representada essa zona isolada do gráfico, juntamente com a reta de regressão linear e respetiva equação e coeficiente de correlação.

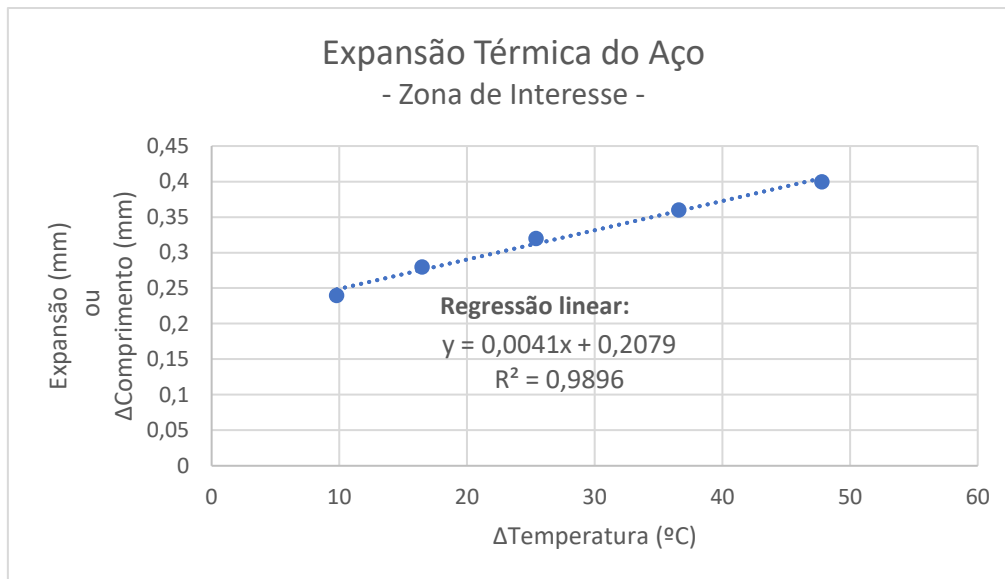


Gráfico 5: Zona de interesse do gráfico de aquecimento da barra de aço

Já para o arrefecimento, e no caso da barra de aço, constatou-se que a temperatura apenas começou a diminuir a partir dos 70s após a retirada da lamparina, tendo decrescido de 115,6 $^{\circ}$ C para 115,3 $^{\circ}$ C. No entanto, de modo a eliminar alguns desvios, considerou-se apenas a zona de interesse a partir do momento 130s.

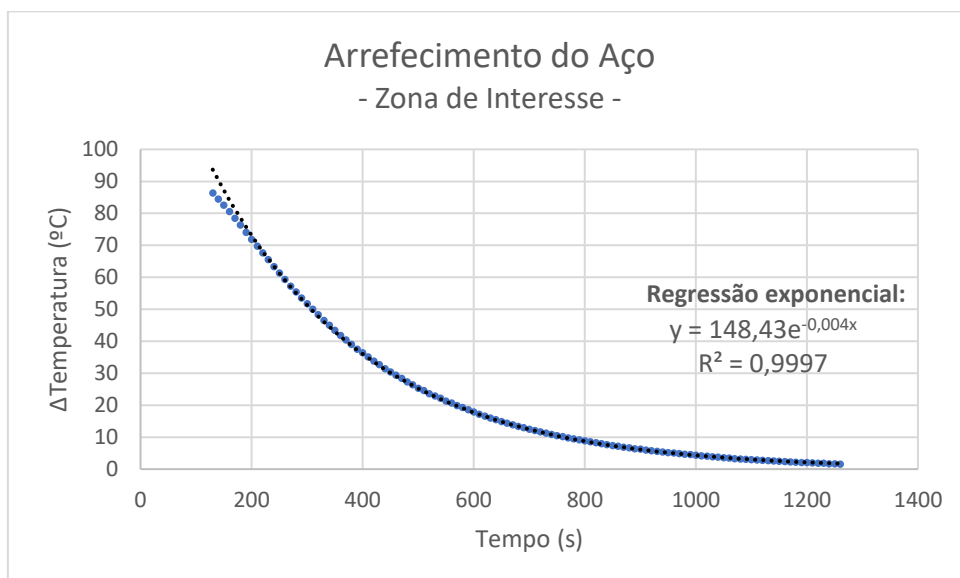


Gráfico 6: Zona de interesse do gráfico de arrefecimento da barra de aço

Observou-se que a zona de interesse para a barra de alumínio no gráfico de aquecimento onde existe um comportamento linear e que maximiza o coeficiente de correlação é compreendida entre os momentos de tempo 31s e 144s.

De seguida encontra-se representada essa zona isolada do gráfico, juntamente com a reta de regressão linear e respetiva equação e coeficiente de correlação.

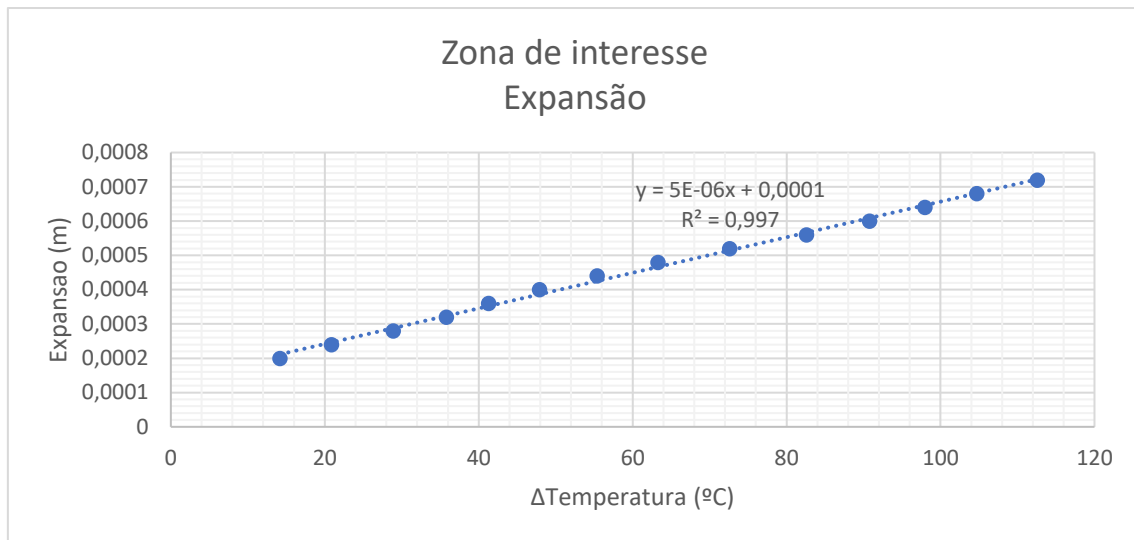


Gráfico 7: Zona de interesse do gráfico de aquecimento da barra de alumínio

Já para o arrefecimento, de modo a eliminar alguns desvios, considerou-se apenas a zona de interesse a partir do momento 50s.

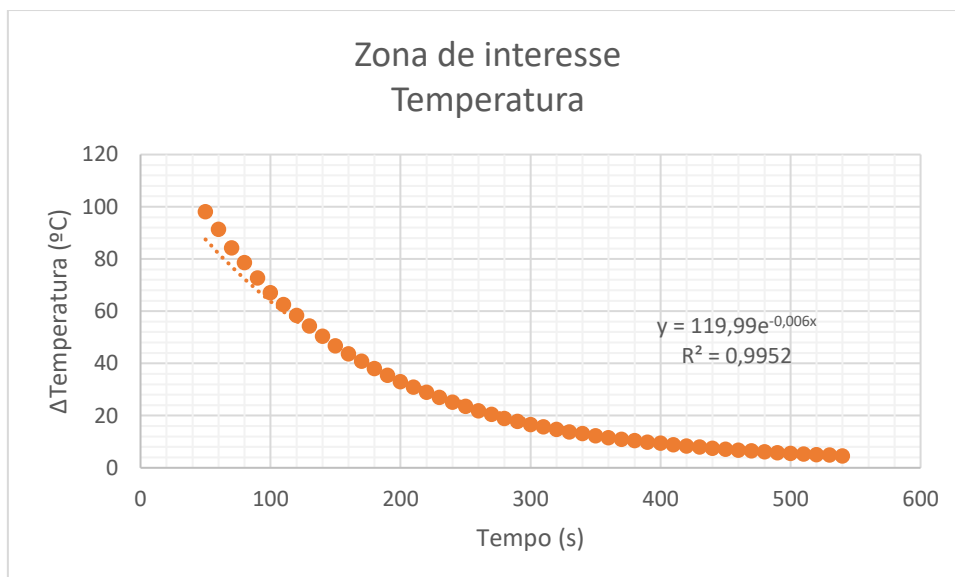


Gráfico 8: Zona de interesse do gráfico de arrefecimento da barra de alumínio

4 – Coeficiente de expansão linear e constante de tempo de arrefecimento (análise gráfica)

Aço

O coeficiente de expansão linear é dado pela seguinte fórmula:

$$\Delta l = \alpha \times l_0 \times \Delta T$$

Ora, considerando que no Gráfico 5 o eixo vertical da reta corresponde à variação do comprimento da barra e o eixo horizontal corresponde à variação da temperatura, concluímos que a parcela $\alpha \times l_0$ corresponde ao declive da reta. Logo:

(Sabendo que $l_0 = 23,95 \text{ cm} = 0,2395 \text{ m}$)

$$0,0041 = \alpha \times 0,2395 \Leftrightarrow \alpha = \mathbf{0,1712} \cong \mathbf{1,7 \times 10^{-5} \times ^\circ C^{-1}}$$

Comparando com o coeficiente tabelado para o aço: $1,2 \times 10^{-5} \times ^\circ C^{-1}$ concluímos que o desvio do coeficiente gráfico face ao teórico na nossa experiência foi de $\frac{|1,2-1,7|}{1,2} \times 100 \cong 41,67\%$.

Já a constante de tempo de arrefecimento pode ser obtida através da Lei de Newton:

$$T - T_a = (T_i - T_a)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Sabendo que o eixo vertical do nosso Gráfico 6 é a variação da temperatura ($T - T_a$) e o eixo vertical é o tempo (t), podemos igualar a expressão da regressão exponencial à reta acima, de onde retiramos:

$$-0,004t = -\frac{t}{\tau} \equiv \tau = \frac{1}{0,004} = \mathbf{250s}$$

Alumínio

O coeficiente de expansão linear é dado pela seguinte fórmula:

$$\Delta l = \alpha \times l_0 \times \Delta T$$

Ora, considerando que no Gráfico 7 o eixo vertical da reta corresponde à variação do comprimento da barra e o eixo horizontal corresponde à variação da temperatura, concluímos que a parcela $\alpha \times l_0$ corresponde ao declive da reta. Logo:

(Sabendo que $l_0 = 23,90 \text{ cm} = 0,2390 \text{ m}$)

$$0,000005 = \alpha \times 0,2390 \Leftrightarrow \alpha = \mathbf{0,00002092} \cong \mathbf{2,1 \times 10^{-5} \times ^\circ C^{-1}}$$

Comparando com o coeficiente tabelado para o alumínio: $2,5 \times 10^{-5} \times ^\circ C^{-1}$ concluímos que o desvio do coeficiente gráfico face ao teórico na nossa experiência foi de $\frac{|2,5-2,1|}{2,5} \times 100 \cong 16,00\%$.

Já a constante de tempo de arrefecimento pode ser obtida através da Lei de Newton:

$$T - T_a = (T_i - T_a)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Sabendo que o eixo vertical do nosso Gráfico 8 é a variação da temperatura ($T - T_a$) e o eixo vertical é o tempo (t), podemos igualar a expressão da regressão exponencial à reta acima, de onde retiramos:

$$-0,006t = -\frac{t}{\tau} \equiv \tau = \frac{1}{0,006} = \mathbf{167s}$$

5 – Coeficiente de transferência de calor por convecção

Aço

Sabendo que:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{h \cdot A}$$

$$\tau = 250s$$

$$m = 55 \text{ g} = 0,055 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} A &= \text{Comprimento} \times 2 \times \pi \times \frac{\text{Diâmetro}}{2} \\ &= 0,2395 \times \pi \times 0,00618 \\ &\cong 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$c = 460 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (valor tabelado}^1\text{)}$$

E resolvendo a fórmula acima em ordem a h , obtemos:

$$h = \frac{0,055 \times 460}{250 \times 0,0046} \cong \mathbf{21,76 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

Considerando que o coeficiente de transferência de calor no ar se situa entre 10 e $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, o valor obtido indica ser aceitável.

Alumínio

Sabendo que:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{h \cdot A}$$

$$\tau = 167s$$

$$m = 19 \text{ g} = 0,019 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} A &= \text{Comprimento} \times 2 \times \pi \times \frac{\text{Diâmetro}}{2} \\ &= 0,2390 \times \pi \times 0,00618 \\ &\cong 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$c = 900 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ (valor tabelado)}$$

E resolvendo a fórmula acima em ordem a h , obtemos:

$$h = \frac{0,019 \times 900}{167 \times 0,0046} \cong \mathbf{22,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}}$$

¹ <http://www.fq.pt/tabelas/capacidades-termicas-massicas>

Considerando que o coeficiente de transferência de calor no ar se situa entre 10 e $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, o valor obtido indica ser aceitável.

Conclusões

Neste trabalho conseguimos tirar diversas conclusões, que incluem a interligação das perguntas de análise de resultados, a aproximação aos valores teóricos e a realização de um trabalho coerente.

Os valores apresentados nos gráficos foram os esperados como se pode observar. Ainda assim, alguns erros são relativamente elevados, o que é causado pelos ajustes dos gráficos e pelo facto de não considerarmos as transferências de calor por radiação.

Começamos por analisar o processo de convecção para ambos os metais do qual verificamos as seguintes conclusões:

- Conseguimos observar no processo de aquecimento que a camada de ar envolvente às barras influencia no valor alcançado para a expansão máxima obtida, independentemente do material. Este fenómeno designa-se de transmissão de calor por convecção e verifica-se nesta experiência, para ambas as barras utilizadas. De facto, o processo de aquecimento do metal começa com a transmissão do calor gerado pela fonte – a chama da lamparina – para o ambiente, ou mais especificamente, para a camada de ar envolvente à barra. O que se verifica na vizinhança imediata da superfície da barra é que o calor transmitido para o ambiente por convecção passa pela camada superficial (ou “fronteira”) do metal e passa a fluir unicamente por condução. Por esta razão, desconsiderando a camada de ar envolvente às barras não haverá aquecimento.
- Provamos pelos cálculos da nossa experiência que o coeficiente de transmissão do calor por convecção é aproximadamente igual para ambos os metais, uma vez que o fluido em que se verifica a convecção é o mesmo em ambos os casos: o ar, o que se adequa com a teoria.
- Ao efetuar as simulações de valores podemos observar que este coeficiente é muito pouco sensível a variações nas dimensões da barra, isto acontece porque a transferência de calor por convecção depende principalmente do fluido ao redor da barra e não do material em si, como foi indicado no parágrafo anterior.

Já para o processo de condução, que também foi estudado nesta experiência, apontamos as seguintes observações:

- Chegamos à conclusão de que o coeficiente de expansão linear do alumínio é maior do que o do aço (que provamos pelos valores tabelados), o que teoricamente significa que o tempo de expansão no arrefecimento é menor para o alumínio, e tal hipótese é, de facto, comprovada pela nossa experiência. Uma vez que os coeficientes de expansão linear são diferentes para ambos os metais torna-se claro que este é dependente de condução, ou seja, da transferência de calor ao longo do próprio metal.
- Da mesma forma verificamos que no caso da barra de Aço, regista-se que nos instantes logo a seguir a retirar a fonte de calor (lamparina), a temperatura no ponto em que se encontra o sensor tende a aumentar ligeiramente, isto é devido ao facto da transmissão de calor por condução se continuar a verificar. A barra de metal, sendo um condutor de calor, transmite calor para o ponto em que se encontra o sensor

através do deslocamento dos elétrons livres das regiões de alta temperatura (a barra) para as regiões de baixa temperatura (o sensor).

Por fim, queríamos observar o comportamento da expansão térmica em função da temperatura, obtida no aquecimento e no arrefecimento para o mesmo material. Daí observamos que as curvas obtidas (Gráfico 9) não se sobrepõem, fenómeno explicado por:

- O processo de aquecimento e de arrefecimento de um mesmo metal são inversos, tendo o primeiro um comportamento logarítmico e o segundo um comportamento exponencial, o que é facilmente observado na nossa experiência.
- As funções subjacentes às curvas são inversas, já que têm o mesmo coeficiente de expansão linear, mas têm sentidos de crescimento opostos o que gera uma simetria pelo eixo estimado $y = x - 20$, representado pela linha preta no gráfico. Como têm comportamentos contrários o resultado esperado e verificado de sobreposição é apenas no cruzamento dos pontos entre as duas curvas na expansão térmica máxima e mínima, pois a temperatura será igual para as duas curvas.
- Esta explicação pode ser suportada pelo fenómeno da histerese que explica que um corpo que sofre uma alteração por estímulo, tende a recuperar o seu estado inicial (ou normal) quando o estímulo é interrompido, neste caso podemos utilizar esta explicação, já que as temperaturas observadas não são grandes o suficiente para causar deformação ao material.

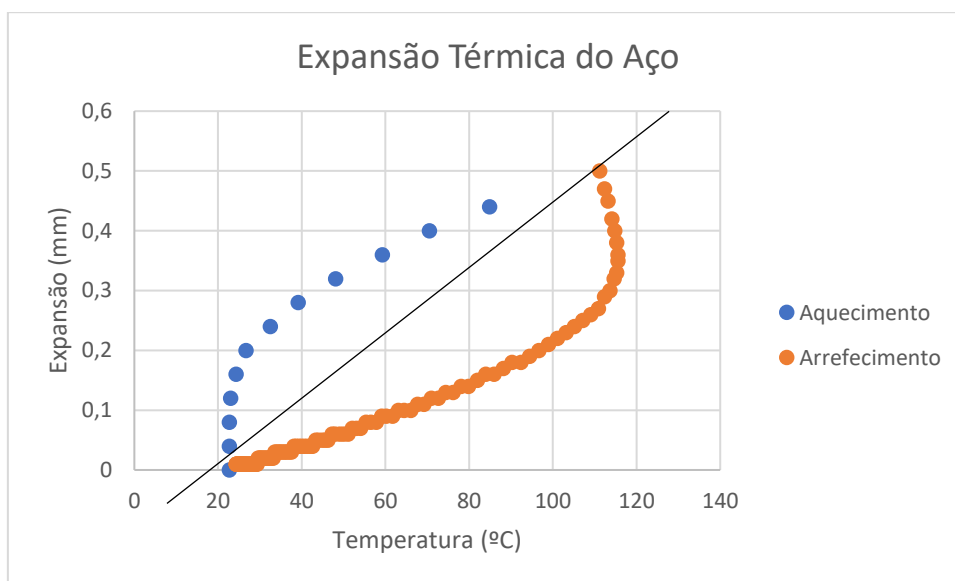


Gráfico 9: Curvas de expansão térmica obtidas no aquecimento e arrefecimento da barra de aço

Com estas conclusões mostramos que o trabalho realizado cumpre com os critérios esperados e a experiência por nós feita teve erros aceitáveis tendo em conta o ambiente laboratorial, pois alcançámos o que era expectável pela teoria.

Referências e Bibliografia

Mosca, G., & Tipler, P. A. (s.d.). *Physics 6ª Edição*.

Burmeister, Louis C., (1993) *Convective Heat Transfer*, 2ª Edição, Wiley-Interscience, p. 107