

# Nur logbook Gonçalo

85%

josefa Santos

G1, PL1

202106964

Lab 119

21-03-2022

Trabalho 1B:

Verificação experimental da Lei de Newton do Arrefecimento

Estudo da Solidificação da Parafina

- Objetivos
- Verificar experimentalmente a Lei de Newton do Arrefecimento
  - Estudar a variação de temperatura da parafina e da água em arrefecimento na atmosfera
  - Determinar a temperatura de transição da fase líquido / sólido da parafina
  - Parametrizar as experiências, visando o ajuste pelo método dos mínimos quadrados

Materiais

- dois suportes universais
- dois tubos de ensaio (um contendo água e outro parafina)
- um gobeli de vidro com água
- aquecedores de disco elétrico
- um medidor de temperatura
- sensores de temperatura
- sensor de temperatura ambiente
- luvas de proteção
- computador com software LoggerPro
- recipiente para transportar água

**Não repetir protocolos  
Só anotar o que é preciso para**

Introdução teórica

Existem 3 estados físicos diferentes para a matéria: gasoso, líquido e sólido.

A natureza física destes estados está relacionada com a competição da energia de ligação e interação entre as moléculas e a energia térmica externa.

No estado gasoso, as moléculas que constituem a matéria possuem muita energia, de tal modo que escapam da interação com as outras, expandindo-se, assim, o sistema de moléculas pelo espaço disponível. No estado líquido, as moléculas movimentam-se livremente, mas permanecem muito próximasumas das outras. já no estado sólido, as moléculas continuam a vibrar, mas estão limitadas a uma posição média constante em relação às outras moléculas.

Para que ocorra uma transformação do estado físico é necessário fornecer, ou absorver, energia, o que leva a uma mudança do comportamento de temperatura do material que sofre este fenômeno. Em geral, a temperatura de fusão dos materiais é bem definida, porém, o mesmo não acontece com a temperatura de solidificação.

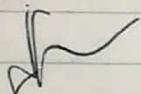
Ainda no âmbito do estudo dos efeitos da temperatura, há que ter em conta um outro fenômeno termodinâmico: a troca de calor entre corpos e/ou o meio ambiente, que é regida pela Lei de Newton.

Para uma mudança de fase ocorrer é necessário fornecer energia para quebrar as ligações entre os elementos constituintes vizinhos. Variação da entalpia de fusão,  $L_f$ , é a quantidade de calor necessária para fundir a unidade de massa de uma determinada substância. O processo é reversível. Durante a mudança de fase a temperatura a que ela ocorre permanece constante.

### Procedimento

1. Colocar os dois tubos de ensaio, cada um no respetivo suporte, no interior do gobelete com água, assente no disco elétrico;
2. Ligar o disco para aquecer a água do gobelete;
3. Iniciar o aquecimento simultâneo da água e da parafina;
4. Observar atentamente o processo de arrefecimento no caso da parafina e registar as ocorrências observadas;
5. Aguarde até ser atingida a temperatura máxima da água líquida no interior do tubo de ensaio;
6. Retirar o tubo de ensaio do banto de aquecimento, manipulando cuidadosamente o suporte, e colocá-lo num local de forma a minimizar o efeito da fonte de calor (aqui, o banto térmico será o ar ambiente, cuja temperatura deve registar ao longo da totalidade da experiência);
7. Assegurar que a sonda está bem colocada no tubo de ensaio com água e que a sonda termométrica tem a ponta bem no interior da água e não encostada ao vidro;
8. Registar os dados experimentais utilizando o software "LoggerPro", previamente preparado:

- Certificar que o interruptor 110 da interface de aquisição está na posição 1;
- Verificar que o cabo do termômetro da água está conectado ao sensor de temperatura;
- Para iniciar o software de aquisição, abrir o ficheiro do LoggerPro com o nome de temperaturas que se encontra no ambiente de trabalho da sessão aulas. A janela b aparece. Deve proceder à escolha dos parâmetros de registo selecionando "data collection" e escalhando os parâmetros sequencialmente em "mode" e em "sampling".
- Certificar que na tabela da direita apresentada na visualização, a coluna da esquerda está a registar o tempo e as outras duas estão a registar temperaturas, sendo a temperatura 1 correspondente à temperatura da água e a temperatura 2 a do sensor de temperatura ambiente que se encontra colocado junto da realização da experiência.

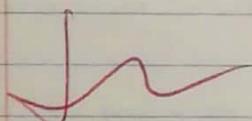


### Execução

Temperatura ambiente inicial : 22,697 °C

Imersão do termômetro : 0,1 °C

Falta tudo que  
lhe condado  
de fazer



### Continuação da introdução teórica

A quantidade de calor que um corpo libera para o exterior é dada por:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda(\theta - \theta_a)$$

sendo  $\lambda$  a constante que caracteriza o material, proporcional à superfície exposta ao ar.

Consequentemente, a libertação de calor conduz a uma diminuição da

temperatura, descrito pela equação:

$$\frac{dQ}{dT} = -C \frac{d\theta}{dt}$$

Bontem as  
equações para  
o equilíbrio.

Destas duas expressões resulta que:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{T} (\theta - \theta_a)$$

onde  $T$  corresponde ao tempo de relaxação.

Physicamente, relaxação é o retorno de um sistema perturbado ao seu estado de equilíbrio. O tempo de relaxação corresponde a uma escala de tempo de duração deste processo físico. Mais concretamente, é dado pela expressão:

$$T = \frac{1}{e} \times T_i$$

A solução desta equação é a Lei de Arrefecimento de Newton, expressa matematicamente na equação:

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_i - \theta_a) e^{-\frac{t}{T}}$$

sendo  $\theta_a$ : temperatura ambiente

$\theta_i$ : temperatura inicial

É relevante notar que se o material possui um calor específico na fase líquida e sólida, as curvas exponenciais serão caracterizadas por valores diferentes de  $T$ .

## Execução

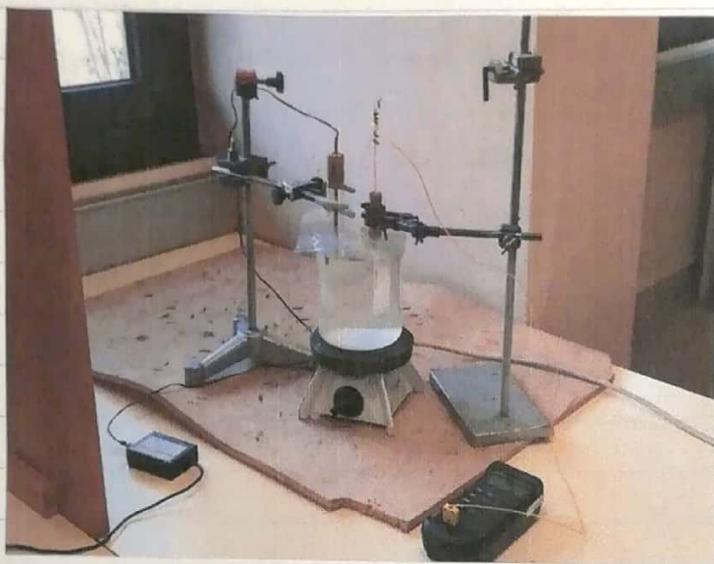


Figura 1: Montagem experimental

Tomou-se por efetuar a montagem da experiência. Verificámos se os sensores de temperatura estavam ligados e conectados corretamente à interface de aquisição. Depois disso, ligámos o divisor elétrico de aquecimento.



Figura 2



Figura 3



Figura 4

Figura 2: Interface de aquisição

Figura 3: Sensor de Temperatura ambiente

Figura 4: Divisor elétrico e gotele em aquecimento

É de notar que, conforme a Figura 4 revela, a água contida no tubo de ensaio não está toda ela contida no golelé, devido a um erro da nossa parte. Assim, como a temperatura da água do tubo de ensaio não é homogénea, o valor da temperatura da água medida pelo sensor, que está em contacto com a zona imersa do tubo de ensaio, pode ser superior à temperatura real. Isto constitui um erro experimental que só foi identificado a meio da atividade experimental.

**deveria estar anulado na sessão.**

Depois da montagem, ligou-se o software Logger Pro e ajustou-se o programa para as medições que se pretendiam fazer.

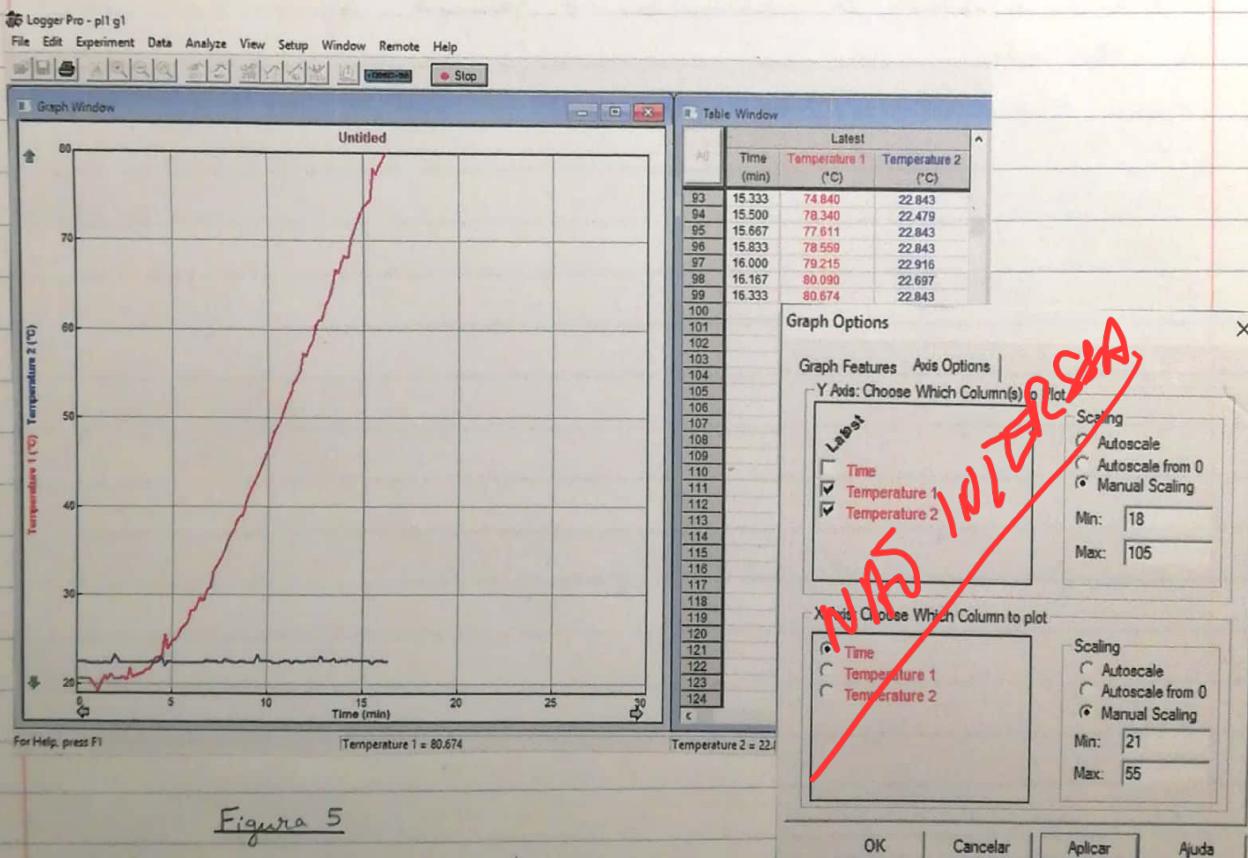


Figura 5

Software aquando do aquecimento da água

Figura 6

Opcões do ajuste de escala

Todos os dados recolhidos foram exportados num ficheiro de texto e analisados posteriormente.

No que toca à experiência da parafina, durante a aula recolhemos os valores da sua temperatura durante aproximadamente 60 minutos, de 10 s em 10 s.



Figura 7: termômetro utilizado - arrefecimento parafina

(Inferior + a marca e modelos do que a imagem!)

### Tratamento de Dados

Para a experiência do arrefecimento o software forneceu-nos cerca de 550 valores. No entanto, por questões práticas, apenas apresentámos valores referentes à 2ª linearização, fita mais à frente.

Time	Temp1	Temp2	Ajuste	Resíduos	Time	Temp1	Temp2	Ajuste	Resíduos	Time	Temp1	Temp2	Ajuste	Resíduos	Time	Temp1	Temp2	Ajuste	Resíduos
min	°C	°C			min	°C	°C			min	°C	°C			min	°C	°C		
50.000	45.74207	25.35371	3.094639	-0.00916	57.667	39.68919	23.20785	2.805164	0.011472	65.167	35.67824	23.35371	2.517091	0.005091	72.833	32.46949	23.49956	2.222616	0.011977
50.167	45.66914	23.20785	3.093238	-0.0123	57.833	39.68919	23.35371	2.798762	0.005071	58.000	39.61626	23.35371	2.792361	0.003142	73.000	32.54241	23.49956	2.216214	-0.00235
50.333	45.52228	23.35371	3.096836	-0.01214	58.167	39.61626	23.35371	2.79599	-0.02109	58.333	39.68919	23.42663	2.775959	-0.02302	73.167	32.59656	23.42663	2.209817	0.007201
50.500	45.37743	23.20600	3.080434	-0.01195	58.500	39.68919	23.35371	2.791256	0.003142	58.667	39.61626	23.42663	2.77599	-0.02306	73.333	32.39656	23.35371	2.203411	0.007099
50.667	45.23158	23.20785	3.074033	-0.01172	58.833	39.68919	23.35371	2.774746	0.003142	59.000	39.61626	23.35371	2.771318	-0.00706	73.500	32.32364	24.66638	2.197009	0.00249
50.833	45.15865	23.20785	3.067631	-0.01477	59.167	39.61626	23.35371	2.766754	0.00204	59.333	45.15864	23.35371	2.76053	0.007654	73.667	32.39656	23.42663	2.190607	-0.012
51.000	44.79402	23.20785	3.061629	-0.00451	59.500	39.68919	23.35371	2.755371	0.003142	59.667	44.57524	23.20785	3.042426	0.003498	73.833	32.32364	23.71834	2.184206	-0.01091
51.167	44.72711	23.20785	3.054282	-0.00731	59.833	39.68919	23.35371	2.750351	0.007654	59.900	39.1787	23.35371	2.753951	-0.008	74.000	31.88608	23.49956	2.177804	0.033262
51.333	44.35646	23.20785	3.048426	0.0029	59.167	39.68919	23.35371	2.747549	0.004193	59.333	44.35646	23.20785	3.042024	0.0029	74.167	31.81315	23.35371	2.171402	0.035438
51.500	44.20842	23.20785	3.039613	-0.0154	59.500	39.68919	23.35371	2.741148	-0.00221	59.667	44.19891	23.20785	3.029221	0.005341	74.333	32.10485	23.49956	2.165001	-0.00484
51.667	44.19891	23.20785	3.029221	0.005341	59.833	39.68919	23.35371	2.734746	0.003142	59.900	39.59529	23.28078	2.734746	0.010341	74.500	32.09193	23.42663	2.158599	-0.00288
52.000	43.98189	23.15493	3.02828	-0.0046	59.667	39.52237	23.28078	2.728344	0.008734	59.833	39.52237	23.64541	2.721943	0.002332	74.667	31.959	23.35371	2.152197	-0.00085
52.167	43.77306	23.20785	3.016418	-0.00035	59.833	39.52237	23.64541	2.721943	0.002332	60.000	38.59529	23.35371	2.715551	-0.00886	74.833	32.03193	23.28078	2.145786	-0.01568
52.333	43.77306	23.20785	3.010016	-0.00675	60.167	38.08481	23.42663	2.70914	0.018788	60.333	38.15773	23.42663	2.702738	0.00745	75.000	31.959	23.49956	2.153934	-0.01365
52.500	44.64817	23.35371	3.003615	-0.0551	60.333	38.15773	23.42663	2.70914	0.018788	60.500	38.15773	23.42663	2.702738	0.00745	75.167	31.81315	23.42663	2.132983	-0.00297
52.667	43.40842	23.55152	2.997213	0.00154	60.667	38.15773	23.42663	2.70914	0.018788	60.833	38.15773	23.42663	2.702738	0.00745	75.333	31.52145	23.20785	2.126591	0.025694
52.833	43.26557	23.20785	2.990811	-0.00064	60.833	38.1108	23.35371	2.696836	0.010945	61.000	38.01108	23.35371	2.696836	0.00217	75.500	31.59457	23.57248	2.120189	0.01041
53.000	43.10864	23.35371	2.584421	-0.00538	61.000	38.01108	23.35371	2.689935	-0.00042	61.167	38.08481	23.28078	2.689935	0.002365	75.667	31.74022	23.35371	2.113788	-0.01352
53.167	42.97087	23.20785	2.978028	0.00131	61.333	38.08481	23.28078	2.689935	0.002365	61.500	38.08481	23.64541	2.737811	0.006772	75.833	31.74022	23.64541	2.107386	-0.01993
53.333	42.82283	23.20785	2.978028	0.00131	61.667	38.08481	23.64541	2.737811	0.006772	61.833	38.08481	23.64541	2.737811	0.006772	76.000	31.59437	23.79126	2.100985	-0.0088
53.500	43.04379	23.35371	2.965205	-0.0152	61.833	38.08481	23.64541	2.737811	0.006772	62.000	37.72018	23.35371	2.670703	0.005433	76.167	31.59437	23.35371	2.094583	-0.0152
53.667	42.59331	23.35371	2.958803	0.04656	62.000	37.72018	23.35371	2.670703	0.005433	62.167	37.72018	23.35371	2.664282	0.00923	76.333	31.66773	23.42663	2.088181	-0.0304
53.833	42.16668	23.49956	2.952401	0.017445	62.167	37.72018	23.35371	2.664282	0.00923	62.333	37.72018	23.35371	2.657925	0.00959	76.500	31.59437	23.49956	2.08178	-0.028
54.000	42.06254	23.15493	2.946	-0.01194	62.333	37.72018	23.35371	2.657925	0.00958	62.667	37.72018	23.35371	2.651525	-0.01889	76.667	31.5681	23.42663	2.075378	0.020118
54.167	42.31458	23.15493	2.939598	-0.00309	62.667	37.72018	23.35371	2.651525	-0.01889	62.833	37.59555	23.35371	2.645123	0.005525	76.833	31.44852	23.35371	2.068976	-0.02296
54.333	42.02283	23.20785	2.939197	0.006017	62.833	37.59555	23.35371	2.645123	0.005525	63.000	37.28262	23.28078	2.638722	0.004341	77.000	31.15681	23.42663	2.026575	0.007515
54.500	41.29956	23.15493	2.926795	0.059449	63.167	37.13677	23.35371	2.63832	0.008462	63.333	36.99091	23.35371	2.625918	0.012694	77.167	31.15681	23.42663	2.056173	0.009013
54.667	41.94999	23.20785	2.920594	-0.00267	63.333	36.99091	23.35371	2.625918	0.012694	63.500	36.64804	23.28078	2.591107	0.006018	77.333	30.54653	24.08297	2.049771	0.062119
54.833	42.81501	23.20785	2.881693	-0.05525	63.500	36.64804	23.35371	2.591107	0.006018	63.667	36.64804	23.35371	2.583343	0.004043	77.500	31.5681	23.42663	2.04337	-0.01189
55.000	41.65824	23.20785	2.907059	0.00129	63.667	36.64804	23.35371	2.583343	0.004043	63.833	36.64804	23.35371	2.573078	0.00239	77.667	31.0958	24.28882	2.036868	-0.00891
55.167	41.80405	23.15493	2.901189	-0.01421	63.833	36.64804	23.35371	2.573078	0.00239	64.000	36.77214	23.35371	2.561902	-0.03516	77.833	30.11096	23.49956	2.030567	-0.00584
55.333	41.36649	23.35371	2.894767	0.003386	64.000	36.77214	23.35371	2.561902	-0.03516	64.167	36.1158	23.20785	2.5555	0.008657	77.999	30.79218	23.42663	2.198575	-0.02160
55.500	41.48941	23.20785	2.883885	-0.00706	64.167	36.1158	23.20785	2.5555	0.008657	64.333	36.1158	23.20785	2.549099	0.013658	78.016	31.01096	23.42663	2.024165	-0.01224
55.667	41.14773	23.20785	2.881984	0.002799	64.333	36.1158	23.20785	2.549099	0.013658	64.500	36.26228	23.20785	2.539391	0.007777	78.033	30.93804	23.42663	2.017763	-0.00908
55.833	41.22054	23.20785	2.875582	-0.00769	64.500	36.26228	23.20785	2.539391	0.007777	64.667	36.26228	23.20785	2.528794	0.001819	78.050	30.71926	23.62020	2.011362	0.013766
56.000	41.01166	23.35371	2.886188	-0.00178	64.667	36.26228	23.20785	2.528794	0.001819	64.833	36.26228	23.20785	2.518716	0.001819	78.067	30.86511	23.35371	2.00496	-0.01223
56.167	40.85601	23.20620	2.862779	0.000118	64.833	36.26228	23.20785	2.518716	0.001819	65.000	36.26228	23.20785	2.5174705	0.000388	78.083	30.79218	23.62020	1.998558	-0.00888
56.333	40.71015	23.55152	2.856377	0.002081	65.000	36.26228	23.20785	2.5174705	0.000388	65.167	36.26228	23.20785	2.5167247	0.0009934	78.099	30.77122	23.49956	1.992157	0.13223
56.500	40.27259	23.55152	2.849975	0.021205	65.167	36.26228	23.20785	2.5167247	0.0009934	65.333	36.27074	23.42663	2.512238	0.002723	78.106	30.79218	23.42663	1.985755	-0.02160
56.667	40.41845	23.42663	2.843574	0.006222	65.333	36.27074	23.42663	2.512238	0.002723	65.500	36.27074	23.42663	2.						

Gráfico 1

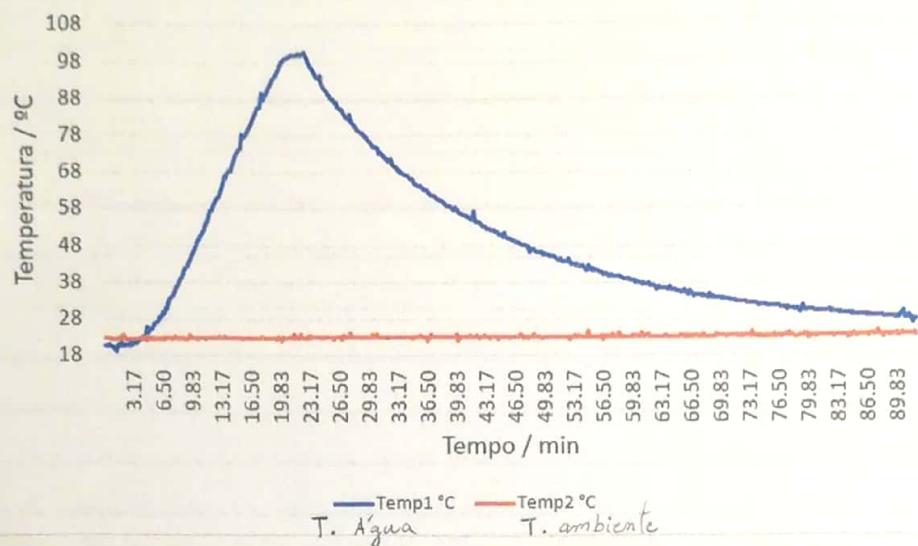


Figura 9 : Gráfico da variação de temperaturas

Como apenas queríamos estudar o processo de arrefecimento, limitámos o mesmo gráfico aos valores a partir do instante 21,5 minuto, no qual a temperatura era 100,65 °C.

Gráfico 2

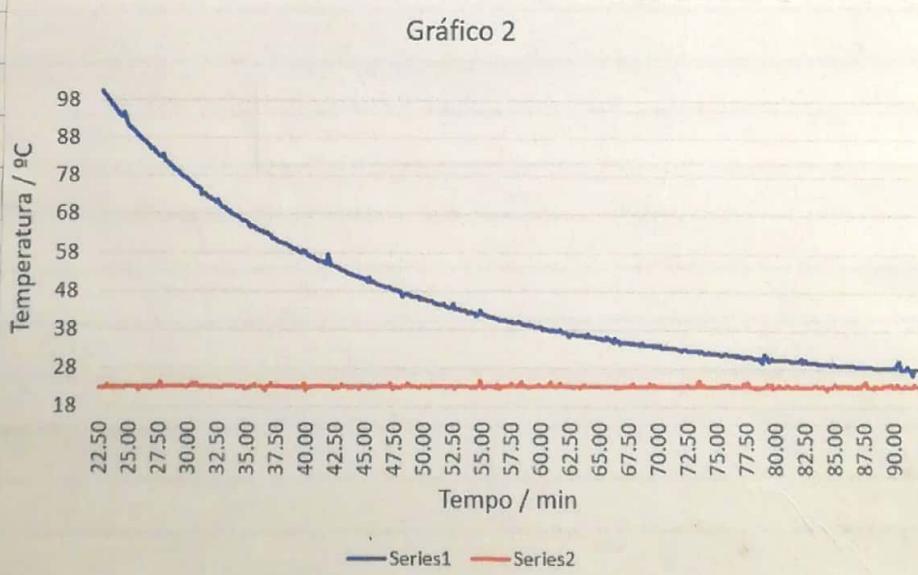


Figura 10: Gráfico do arrefecimento

Uma vez que a temperatura ambiente flutua ao longo da experiência, chegámos a um valor fixo calculando a média de todos os valores registados:

Houve drift? Verificação?

Temperatura ambiente	
Média	23.348
Desvio Padrão	0.2860
Incerteza da média	0.014

$$T_{amb} = (23,348 \pm 0,014)^\circ C$$

Figura 11: Análise da temperatura ambiente

Note: Uma vez que foram feitas mais de 50 medições, apresentamos o valor da incerteza com 2 algarismos significativos.

-II-

Conforme aquilo que se esperava pela Lei de Arrefecimento de Newton, o gráfico 2 apresenta claramente uma tendência exponencial. Por esse motivo, para que os dados fossem estudados de forma mais cuidadosa e rigorosa, decidimos linearizar a equação da Lei de Arrefecimento, adotando uma escala logarítmica:

$$\theta(t) = \theta_a + (\theta_i - \theta_a) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\Leftrightarrow \theta_t - \theta_a = (\theta_i - \theta_a) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\Leftrightarrow \ln(\theta_t - \theta_a) = \ln(\theta_i - \theta_a) - \frac{1}{\tau} t$$

$$\Leftrightarrow \ln(\theta(t) - \theta_a) = -\frac{1}{\tau} t + \ln(\theta_i - \theta_a)$$

m: declive

b: ordenada na origem

### 1ª Linearização

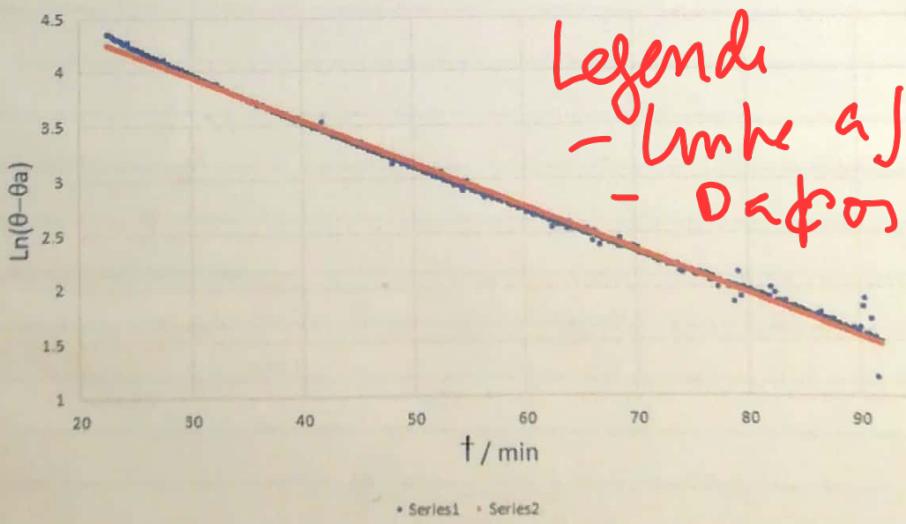


Figura 12: 1ª Linearização

Parâmetros de Ajuste			
$m$	-0.03997	5.142944	
$s_m$	0.000113	0.00686	
$r^2$	0.99668	0.04648	

$m$  : Declive

$b$  : Ordenada na origem

$s_m$  : Desvio-padrão do declive

$s_y$  : Fator de regressão linear

$s_b$  : Desvio-padrão da ord. na origem

$s_y$  : Desvio-padrão associado à reta de ajuste

Figura 13

Parâmetros de ajuste 1<sup>a</sup>: Linearização

Note-se que mesmo na escala logarítmica os valores revelaram alguma curvatura na sua dispersão do gráfico, principalmente para os instantes iniciais.

O gráfico de resíduos associado a esta linearização é:

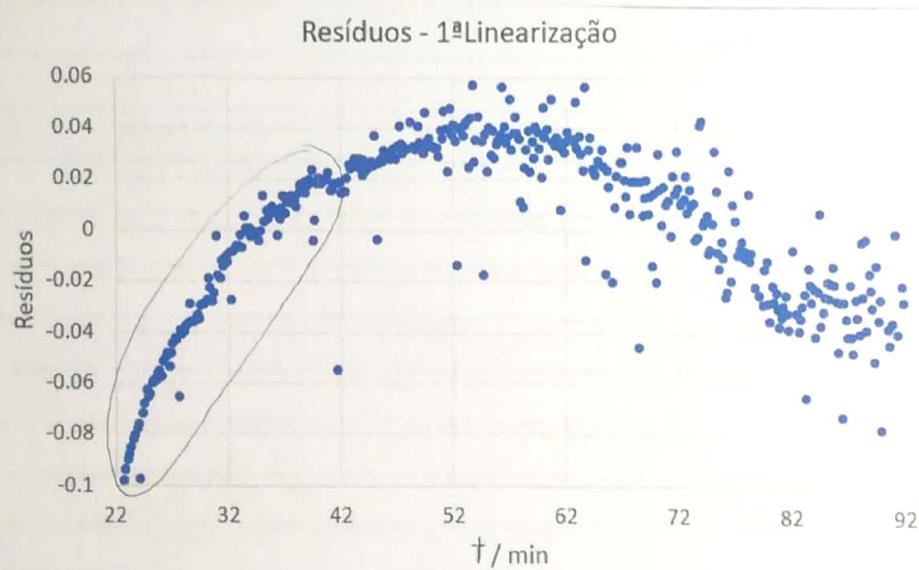


Figura 14: Resíduos referentes à 1<sup>a</sup> Linearização

Este gráfico revela claramente a existência de uma tendência para os instantes correspondentes ao início do processo de arrefecimento.

Esta tendência pode ter diversas causas experimentais, por exemplo, a mudança do valor da capacidade térmica da água com a variação da temperatura.

Independentemente da causa, para um estudo mais rigoroso do processo de arrefecimento, construi-se uma outra linearização, com dados a partir do instante 45 minutos.

**NOTA IMPORTANTE :**

Ainda que nos gráficos apresentados se considere que o instante  $t=0$  min corresponde ao início do processo de aquecimento, na construção das tabelas dos parâmetros de ajuste, considera-se esse instante o início do processo de arrefecimento.

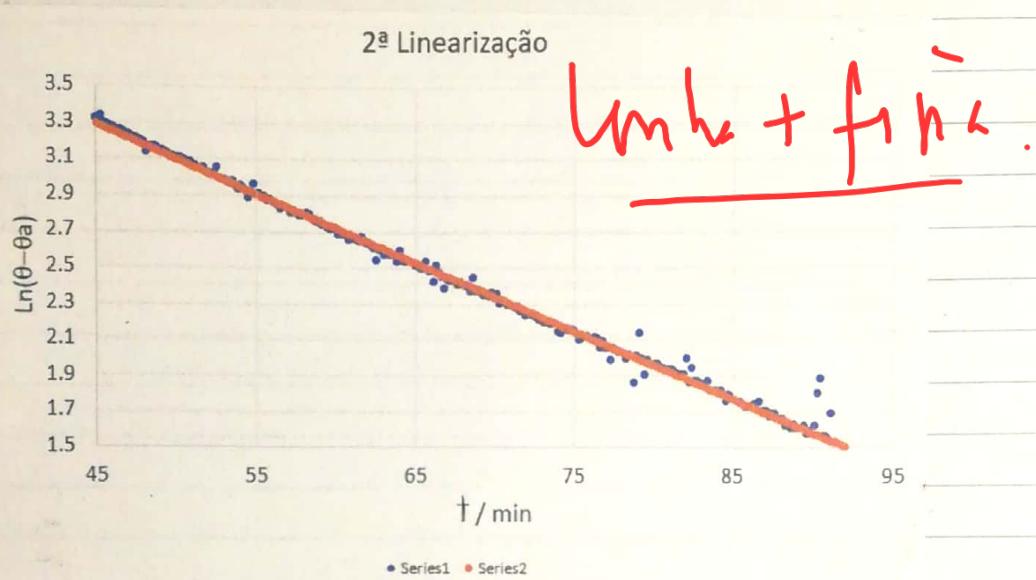


Figura 15: 2ª Linearização

Parâmetros de Ajuste					
$m$	-0.038	<del>4.99532</del>	$b$	$\curvearrowright 3,290148$	
$s_m$	0.00018	0.01244	$s_m$		
$r^2$	0.99386	0.0408	$s_y$		

Figura 16: Parâmetros de ajuste - 2ª Linearização

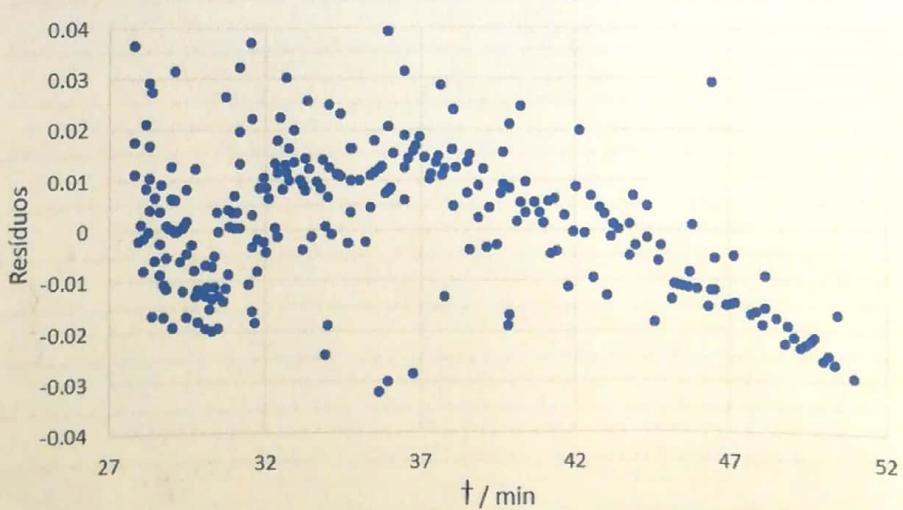


Figura 17: Gráfica de resíduos - 2ª Linearização

A dispersão dos resíduos neste 2º gráfico de resíduos não é ainda completamente aleatória, contudo, a dispersão é mais aleatória do que o 1º gráfico de resíduos e os valores são inferiores aos referentes à 1ª Linearização. Por essa razão, conclui-se que a 2ª linearização é mais correta e mais representativa dos dados do que a 1ª linearização.

Optou-se por não expor os gráficos com barras de erro uma vez que dificultam a leitura e análise do gráfico, não adicionando informação relevante adicional, neste caso.

### Resultados relativos à 2ª linearização

A partir da declive da reta de ajuste da 2ª linearização ( $m$ ) foi-nos possível calcular  $\tau$ , o tempo de relaxação, uma vez que, como já foi referido:  $m = -\frac{1}{\tau}$

### Cálculo de $\tau$

$$\tau = -\frac{1}{m} \Leftrightarrow \tau = -\frac{1}{-0,03798} \Leftrightarrow \tau = 26,3296 \text{ min}$$

### Incertezas de $\tau$ (método de propagação de incertezas)

$$\mu^2(\tau) = \left( \frac{dm}{dt} \right)^2 \mu^2(m) = \left( \frac{1}{m^2} \right)^2 \mu^2(m)$$

$$\Leftrightarrow \mu(\tau) = \frac{1}{m^2} \mu(m)$$

$$\Leftrightarrow \mu(\tau) = \frac{1}{(-0,03798)^2} \cdot 0,000178$$

$$\Leftrightarrow \mu(\tau) = 0,123 \text{ min}/$$

Obtém-se então o tempo de relaxação associado:

$$\tau = (26,33 \pm 0,12) \text{ min}$$

## Calcular de $\theta_i - \theta_a$

$$\ln(\theta_i - \theta_a) = b \Leftrightarrow \theta_i - \theta_a = e^b = e^{3,290148} = 26,84^\circ C$$

$$\begin{aligned}\mu(\theta_i - \theta_a) &= \mu(\ln(\theta_i - \theta_a))(\theta_i - \theta_a) \\ &= 0,004838 \cdot 26,84 \\ &= 0,12988\end{aligned}$$

$$\theta_i - \theta_a = (26,84 \pm 0,13)^\circ C$$

Inverteja apresentada com 2 algarismos significativos visto que fizemos mais de 50 medições.

## Reprodutibilidade

Comparámos o nosso valor com o valor do colega Miguel Vieira, G1, PL6, n° 202107506.

$$\begin{array}{l|l} \text{Nosso valor experimental: } 1579,80 \pm & E(%) = \frac{|1579,80 - 1306,55|}{1306,55} \times 100 \\ \text{Outro valor experimental: } 1306,55 \pm & \approx 20,91\% \end{array}$$

Este valor corresponde a um erro relativamente elevado. Ainda que o valor da reproducibilidade fosse mais rigoroso se tivéssemos mais dados de outros grupos, o valor deste erro indica que o resultado seria bastante mais preciso se a experiência fosse repetida em diferentes condições.

## 2.ª Experiência

### Solidificação da parafina

Foram registados valores da temperatura da parafina de 10 em 10 segundos, utilizando o cronómetro de um telemóvel, durante cerca de uma hora, directamente numa folha do Excel (como já referido).

Com os dados experimentais obtidos e com o auxílio das funcionalidades gráficas do Excel, construiu-se um gráfico da temperatura da parafina ( $T$ ) em função do tempo ( $t$ ), até aproximadamente  $40^\circ C$ , como é indicado no protocolo.

Dados - Arrefecimento da Parafina

t / s	T / °C												
0	100.1	290	63.2	580	56.9	870	55.8	1160	53.2	1450	47.5	1740	41.2
10	94	300	62.4	590	56.9	880	55.7	1170	53.1	1460	47.2	1750	41.1
20	91.7	310	61.7	600	56.9	890	55.6	1180	53	1470	47	1760	41
30	90	320	61	610	56.8	900	55.6	1190	52.8	1480	46.7	1770	40.8
40	88.4	330	60.4	620	56.8	910	55.5	1200	52.7	1490	46.4	1780	40.7
50	87	340	59.6	630	56.7	920	55.4	1210	52.5	1500	46.1	1790	40.6
60	85.7	350	59	640	56.7	930	55.3	1220	52.4	1510	45.8	1800	40.5
70	84.4	360	58.6	650	56.7	940	55.3	1230	52.2	1520	45.5	1810	40.4
80	83.2	370	58.2	660	56.7	950	55.2	1240	52.1	1530	45.2	1820	40.2
90	82	380	57.9	670	56.6	960	55.1	1250	51.9	1540	44.9	1830	40.1
100	80.9	390	57.6	680	56.6	970	55	1260	51.7	1550	44.7	1840	40
110	79.8	400	57.5	690	56.6	980	55	1270	51.5	1560	44.4		
120	78.7	410	57.4	700	56.5	990	54.9	1280	51.3	1570	44.1		
130	77.6	420	57.3	710	56.5	1000	54.8	1290	51.2	1580	43.9		
140	76.6	430	57.2	720	56.4	1010	54.7	1300	51	1590	43.7		
150	75.5	440	57.1	730	56.4	1020	54.6	1310	50.8	1600	43.4		
160	74.5	450	57.1	740	56.4	1030	54.6	1320	50.6	1610	43.2		
170	73.6	460	57	750	56.4	1040	54.5	1330	50.4	1620	43		
180	72.6	470	57	760	56.3	1050	54.4	1340	50.2	1630	42.8		
190	71.7	480	57	770	56.3	1060	54.3	1350	50	1640	42.6		
200	70.9	490	57	780	56.2	1070	54.2	1360	49.8	1650	42.4		
210	70	500	57	790	56.2	1080	54.1	1370	49.6	1660	42.3		
220	69	510	57	800	56.1	1090	54	1380	49.3	1670	42.1		
230	68.1	520	57	810	56.1	1100	53.9	1390	49.1	1680	42		
240	67.2	530	57	820	56	1110	53.8	1400	48.8	1690	41.9		
250	66.4	540	57	830	56	1120	53.7	1410	48.6	1700	41.7		
260	65.6	550	56.9	840	55.9	1130	53.6	1420	48.3	1710	41.6		
270	64.8	560	56.9	850	55.9	1140	53.5	1430	48	1720	41.5		
280	64	570	56.9	860	55.8	1150	53.3	1440	47.8	1730	41.3		

Figura 18 : Dados da temperatura (a quando do seu arrefecimento)

NOTA : incerteza associada aos valores de temperatura : 0,1°C

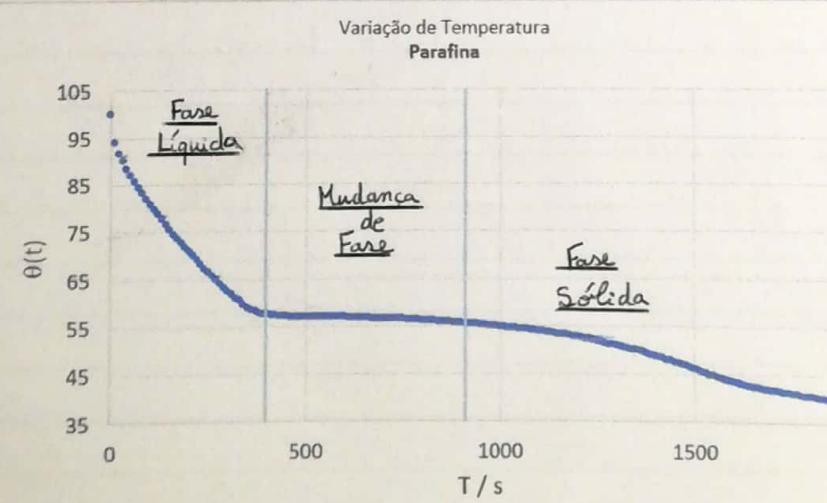


Figura 19 : Gráfico representativo da mudança de fase

As barras de erro são muito pequenas e não acrescentam informação relevante, tendo sido deixadas de fora deste gráfico.

### Comentários tendênciar nas gamas experimentais

Através da análise do gráfico não facilmente identificamos 3 fases: Uma 1<sup>a</sup> fase em que a temperatura da parafina diminui a um ritmo aproximadamente constante. Os valores associados a esta fase encontram-se entre 100,1°C e os 57,5°C. Durante esta fase a parafina mantém-se no mesmo estado físico, isto é, no Estado líquido.

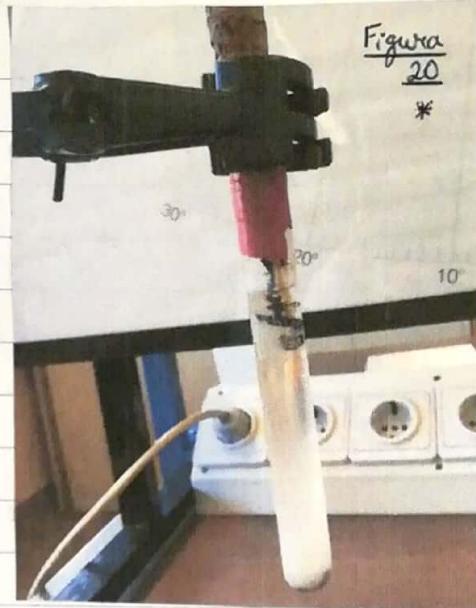


Figura  
20

\* Estado líquido

Uma 2<sup>a</sup> fase, em que os valores da parafina se encontram aproximadamente constantes, valores localizados entre os 57,5°C e os 54,4°C. Note-se que existe uma diferença de 3,1°C entre estes dois valores, graficamente, tendo em conta a totalidade dos dados, pode-se considerar que a reta é relativamente constante. Fisicamente, isto significa que a parafina não está nem totalmente no estado sólido nem totalmente no estado líquido: encontra-se numa mistura dos dois estados. Consequentemente a temperatura mantém-se constante.

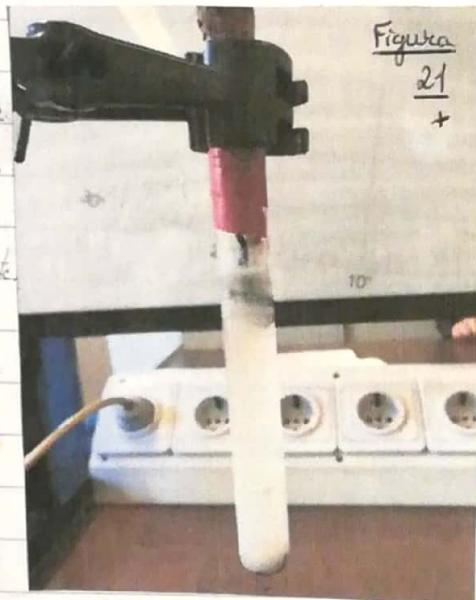


Figura  
21

+ Mudança de Fase

Numa 3<sup>a</sup> e última fase a temperatura da parafina volta a diminuir. Isto ocorre para valores de temperatura inferiores aos 54,4°C (aproximadamente), até que finalmente a parafina atinge a temperatura ambiente, onde se estabelece um equilíbrio térmico entre a parafina e a atmosfera da sala onde se realizou a experiência. Nesta etapa, a parafina encontra-se em estado sólido. Apesar incluirmos no gráfico os valores até aos 40°C, uma vez que quando a parafina atinge esse valor, já se verificaram as 3 fases relevantes, sendo o comportamento do gráf. a partir daí previsível.

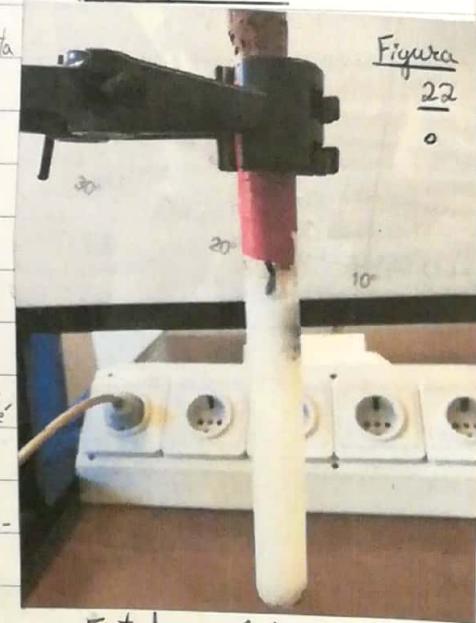


Figura  
22

○ Estado sólido

## Cálculo da temperatura de solidificação

A temperatura de solidificação de um dado material corresponde à temperatura a partir da qual o material começa a estar no estado sólido.

Conforme já foi discutido na análise do gráfico da temperatura da parafina em função do tempo, pode-se considerar que esta temperatura é 57,5°C.

Sabe-se, teoricamente, que:

→ **obtidos como?**

$$\rho(\text{parafina}) = 900 \text{ Kg cm}^{-3}$$

$$\theta_{\text{furão}}(\text{parafina}) = 330,0 \text{ K} = 56,9^\circ\text{C}$$

Assim, é possível calcular o erro associado ao valor experimental:

$$\text{Erro absoluto: } S = |57,5 - 56,9| = 0,6^\circ\text{C}$$

$$\text{Erro relativo: } E (\%) = \frac{0,6}{56,9} \times 100 = 1,05\%$$

$$\begin{aligned}\text{Grau de exatidão} &= (100 - 1,05)\% \\ &= 98,95\%\end{aligned}$$

Ainda que a leitura do valor experimental da temperatura de solidificação da parafina não tenha sido a mais rigorosa possível, devido a possíveis ambiguidades na leitura do gráfico da variação de temperatura da parafina, obtém-se um grau de exatidão extremamente elevado (98,95%).

## Conclusões

- Nesta atividade experimental verificou-se a Lei de Arrefecimento de Newton, através do estudo do arrefecimento da água. O gráfico

da temperatura da água em função do tempo (gráfico 2) corresponde ao modelo exponencial previsto. Através de uma linearização correta desse gráfico e da Lei de Arrefecimento de Newton obtém-se o tempo de relaxação da água:

$$\tau = (26,33 \pm 0,12) \text{ min}$$

- O estudo do arrefecimento da parafina permitiu estudar o fenómeno de mudança de fase. No gráfico da temperatura da parafina foram identificadas 3 fases diferentes: estado líquido, mudança de fase e estado sólido. A interpretação do gráfico permite concluir que o valor experimental da temperatura de solidificação da parafina é  $57,5^\circ\text{C}$ . Comparando com um valor tabulado para este valor ( $56,9^\circ\text{C}$ ), obtém-se um erro de  $1,05\%$ , o que reflete um elevado grau de exatidão na determinação deste valor.
- É de notar que durante a mudança de fase, o gráfico não se mantém constante, existindo uma ligeira curvatura. Isto pode resultar de um erro experimental, por exemplo, do sensor de temperatura estar em contacto com o vidro do tubo de ensaio. Este erro dificulta a leitura correcta do valor experimental da temperatura de solidificação da parafina.

**+ Inevitavelmente a parafina não é pura.**

- Com dados de outro grupo, conclui-se que a experiência conduzia a um resultado mais preciso se fosse reflectida em condições diferentes. O erro calculado quando se compararam dois valores de tempo de relaxação da água obtidos em experiências diferentes ( $20\%$ ) indica a grande sensibilidade da experiência às condições ambientais.

**(a manca entrou na cont. a refriamento)**

Joséfa Santor  
Grupo 1, PL1  
202106964