

PRÁCTICA 3 CAPACIDAD CALORÍFICA DE UN SÓLIDO

1.- INTRODUCCIÓN:

1.1 Modelo de Debye

Llamamos **capacidad calorífica** de un sólido al calor necesario para elevar en un grado la temperatura de una determinada cantidad de material (se mide en Joule/°C o J/K):

$$C = \frac{\delta Q}{\delta T} \quad [6.1]$$

Es frecuente utilizar la **capacidad calorífica molar** (J/°C mol o J/ K mol), en la que la cantidad de materia considerada es un mol, mientras que en la definición de **calor específico** se suprime la dependencia con la masa total involucrada (J/ °C kg o J/ K kg).

La capacidad calorífica de cada material depende de la existencia en dicho material de mecanismos de acumulación de energía, a través de la excitación de vibraciones de los átomos o de la excitación de electrones a los niveles superiores de energía. En la mayor parte de los sólidos (con excepción de los metales a muy baja temperatura) la capacidad calorífica está determinada esencialmente por la energía que puede acumular el sólido en forma de vibraciones de los átomos que lo componen, en torno a sus posiciones de equilibrio.

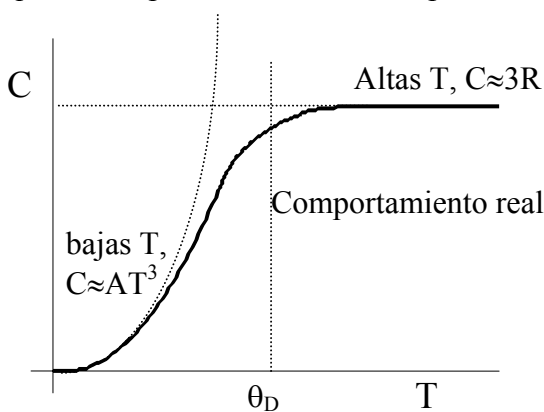


Figura 6.1

En la teoría clásica de los calores específicos, la energía media a una temperatura dada se calcula teniendo en cuenta todas las energías posibles y calculando el valor promedio mediante la estadística de Boltzmann. Al hacer el cálculo de la energía media se llega a la conclusión de que, a cada grado de libertad de las partículas del sistema le corresponde una energía media $k_B T/2$ (este es el llamado principio de equipartición de la energía). Así, en los gases monoatómicos, donde cada partícula tiene tres grados de libertad, la energía media por partícula sería $3k_B T/2$. La energía interna por mol sería:

$$U(T) = N_A \frac{3}{2} k_B T \quad [6.2]$$

donde N_A es el número de Avogadro, y, en consecuencia, la capacidad calorífica molar sería $C=(3/2)k_B N_A$. En un sólido, si se consideran las vibraciones independientes de los átomos, todos con la misma frecuencia y considerando tres grados de libertad, se obtiene una energía molar promedio de valor $3N_A k_B T$, de la que se deduce un calor específico molar de $3N_A k_B=3R$. En 1819 Dulong y Petit descubrieron que la mayor parte de los sólidos presentaban una capacidad calorífica molar a temperatura ambiente de aproximadamente 25 J/mol K. Dicho valor coincidía con el predicho por el modelo anterior, lo cual supuso un triunfo de la teoría cinética clásica. Sin embargo, pronto se observaron desviaciones a temperaturas más bajas, y se constató que dicha constante constituía en realidad un límite superior: por debajo de cierta temperatura característica de cada sólido, llamada temperatura de Debye (θ_D), la capacidad calorífica disminuye y tiende a cero proporcionalmente al cubo de la temperatura para las temperaturas próximas a cero, como muestra la figura 6.1.

Según del modelo de Debye (1912), el origen de este comportamiento hay que buscarlo tanto en la estadística cuántica, a la que obedece la excitación de las vibraciones de un sólido, como en el hecho de que dichas vibraciones, como hemos visto en la práctica correspondiente, se distribuyen en modos (acústicos y ópticos). En la aproximación de Debye se considera válida la relación de

dispersión $\omega = v_s k$, con v_s la velocidad del sonido constante. Como se ha visto en una práctica anterior, esta relación es válida para valores pequeños de ω (correspondientes a valores pequeños de k , es decir, longitudes de onda muy largas). Las ondas acústicas que pueden propagarse en un sólido en todas las direcciones del espacio, serán las que tengan un valor de k contenidos en una esfera de radio k_{MAX} . El número de ondas posibles con valores de k comprendidos entre k y $k+dk$ será proporcional al volumen comprendido entre las esferas de radio k y $k+dk$. Si llamamos g a la constante de proporcionalidad, dicho número será:

$$dN = g4\pi k^2 dk = \frac{4\pi g}{v_s^3} \omega^2 d\omega \quad [6.3]$$

Teniendo en cuenta que la excitación de las vibraciones obedece a la estadística de Bose-Einstein, podemos calcular la energía total asociada a la excitación de ondas elásticas en un sólido, para ello, multiplicaremos la energía asociada a una onda de frecuencia ω ($\hbar\omega$) por el número de fonones excitados a una temperatura dada, $n(\omega)$, y por el número total de ondas posibles con frecuencia comprendida entre ω y $\omega+d\omega$, e integraremos entre cero y la frecuencia máxima:

$$U(T) = \frac{4\pi g}{v_s^3} \int_0^{\omega_{MAX}} \frac{(\hbar\omega)\omega^2 d\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1} = \frac{4\pi g \hbar}{v_s^3} \int_0^{\omega_{MAX}} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1} \quad [6.4]$$

Hagamos el cambio de variable $u = \hbar \omega/k_B T$, y pongamos todo en función de u :

$$\omega = \frac{k_B T}{\hbar} u \quad d\omega = \frac{k_B T}{\hbar} du \quad [6.5]$$

Al sustituir en la expresión de $U(T)$, obtenemos:

$$U(T) = \frac{4\pi g k_B^4}{v_s^3 \hbar^3} T^4 \int_0^{u_M} \frac{u^3 du}{e^u - 1} \quad [6.6a]$$

donde el límite de la integral en la variable u será $u_M = \hbar \omega_M/k_B T = \theta_D / T$, siendo θ_D la temperatura de Debye. El volumen de la esfera de radio k_M es $4\pi k_M^3/3$, y dicha cantidad multiplicada por g resulta ser número total de modos, que también se puede escribir como 3 (grados de libertad) por el número de átomos N . Teniendo en cuenta además la definición de la temperatura de Debye, la expresión anterior también se puede escribir de la siguiente forma:

$$U(T) = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{u_M} \frac{u^3 du}{e^u - 1} \quad [6.6b]$$

En el rango de bajas temperaturas, $k_B T \ll \hbar \omega_{MAX}$ ($T \ll \theta$) y, por tanto, u_M es muy grande y se puede considerar infinito, de manera que la integral no depende de la temperatura y vale $\pi^4/15$:

$$U(T) = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \frac{\pi^4}{15} \quad [6.7]$$

y, por tanto, la capacidad calorífica será (para capacidad calorífica molar, $N=N_A$):

$$C(T) = \frac{dU(T)}{dT} = \frac{12\pi^4 k_B N}{5} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 = AT^3 \quad [6.8]$$

que se corresponde con el resultado experimental.

En el rango de altas temperaturas, $k_B T \gg \hbar \omega_{MAX}$ ($T \gg \theta$) y por tanto u_M es mucho menor que 1 en todo el rango de integración, por lo que podemos desarrollar la exponencial $e^u = 1 + u$, de manera que el denominador de la integral vale u y el integrando queda igual a u^2 . Al hacer la integral obtenemos:

$$U(T) = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{u_M} \frac{u^3 du}{e^u - 1} = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \int_0^{u_M} u^2 du = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\theta}\right)^3 \frac{u_M^3}{3} \quad [6.9]$$

y, sustituyendo el valor de u_M ,

$$U(T) = 3Nk_B T \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \left(\frac{\theta_D}{T}\right)^3 = 3Nk_B T \quad [6.10]$$

Por lo que la capacidad calorífica será constante y coincide con el valor clásico de Dulong y Petit (considerando la capacidad molar $N=N_A$):

$$C = \frac{dU(T)}{dT} = 3N_A k_B = 3R \quad [6.11]$$

De manera que este modelo es capaz de explicar el comportamiento de la capacidad calorífica de los sólidos tanto a bajas como a altas temperaturas (figura 6.1).

1.2 Medida del calor específico

Si suministramos al sólido de capacidad calorífica C una potencia W , y suponemos que el sólido emite calor proporcionalmente a la diferencia de temperatura, con una constante de proporcionalidad K , la ecuación diferencial que determina el calentamiento sería:

$$C \left. \frac{d(\Delta T)}{dt} \right|_{cal} = W - K\Delta T \quad [6.12]$$

Si el calor específico fuese constante, la temperatura en función del tiempo vendría dada por:

$$\Delta T(t) = \frac{W}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{C}t}\right) \quad [6.13]$$

Por otra parte, una vez alcanzada la temperatura máxima, $\Delta T_M = W/K$, si se deja de suministrar energía al sólido, las ecuaciones serían:

$$C \left. \frac{d(\Delta T)}{dt} \right|_{enf} = -K\Delta T \quad [6.14]$$

De nuevo, si el calor específico fuese constante, la temperatura en función del tiempo vendría dada por:

$$\Delta T(t) = \frac{W}{K} e^{-\frac{K}{C}t} \quad [6.15]$$

A partir de la temperatura máxima y de la constante de tiempo podríamos determinar tanto C como K . Si el calor específico no es constante, conocidas las curvas de calentamiento y enfriamiento, se puede calcular el calor específico a partir de ellas. Si llamamos $m_C = d(\Delta T)/dt|_{cal}$ y $m_E = d(\Delta T)/dt|_{enf}$ a las pendientes de las curvas de calentamiento y enfriamiento a una temperatura

dada, es fácil ver, restando ambas ecuaciones diferenciales, que la capacidad calorífica a esa temperatura vendrá dada por:

$$C(\Delta T) = \frac{W}{m_C - m_E} = \frac{W}{m_C + |m_E|} \quad [6.16]$$

Dado que la resistencia de calentamiento tiene una masa comparable a la de las muestras, lo que medimos en realidad es la capacidad calorífica total C Suma de la de la muestra (C_M) y la de la resistencia (C_R). De ahí que sea necesario medir previamente C_R .

2. MATERIAL DISPONIBLE

- a) Una resistencia de calentamiento (masa 4.6 g) montada en un soporte de aluminio.
- b) Un capuchón pequeño de aluminio (masa 0.5 g) que se usa para fijar el termopar en la medida de la respuesta térmica de la resistencia de calentamiento.
- c) Las muestras son cilindros huecos en los que se introduce la resistencia de calentamiento y con un agujero pequeño para introducir un termopar blindado de cromel-alumel para la medida de la temperatura de la muestra. Hay una muestra de aluminio (8.2 g) y una de grafito (5 g). La resistencia de calentamiento está en serie con una resistencia de en torno a 1 Ω ohmio. R se puede calcular a partir de la corriente y de V_R .
- d) Un amplificador (de ganancia 300) para amplificar la tensión suministrada por el termopar.
- e) Una fuente de alimentación.
- f) Un ordenador con tarjeta de adquisición de datos.

3. MEDIDAS A REALIZAR

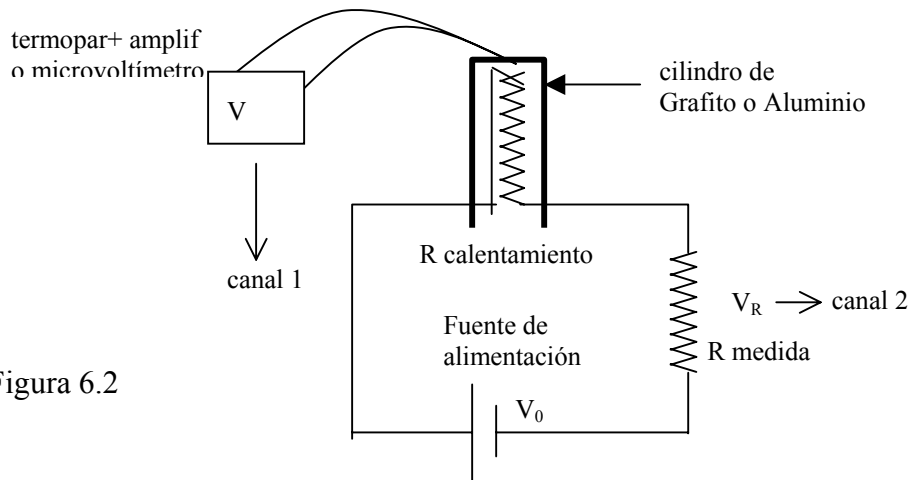


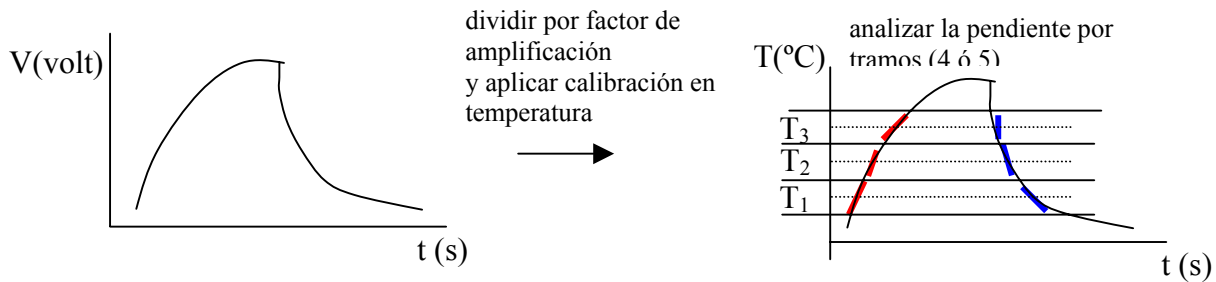
Figura 6.2

Utilizando el programa de adquisición "Registrador gráfico " :

- 1) Registrar y guardar las curvas de calentamiento y enfriamiento de la resistencia (usando el cilindro pequeño de aluminio) para una tensión aplicada de 10 V (tiempo de adquisición de 880 segundos).
- 2) Registrar y guardar las curvas de calentamiento y enfriamiento de ambas muestras para una tensión aplicada de 18 V (tiempo de adquisición de 880 segundos).

La potencia suministrada en cada instante se puede calcular a partir de la tensión aplicada (V_0) y la tensión en la resistencia de medida (V_R). Como la corriente es $I=V_R/R$ y la diferencia de potencial en la resistencia de calentamiento es $V_C=V_0 - V_R$, la potencia será $W= (V_0 - V_R)I$. NO SE DEBE SUPERAR NUNCA LOS 10 W DE POTENCIA PARA LA RESISTENCIA SOLA, NI LOS 25 PARA LA RESISTENCIA CON LAS MUESTRAS. La temperatura se obtiene directamente de la

señal medida por el canal 1 (se encuentra almacenada en volt), dividida por la ganancia del amplificador (300). Utilizar las tablas o gráficas de calibración del termopar para transformar los valores de tensión (en mV) en temperatura.

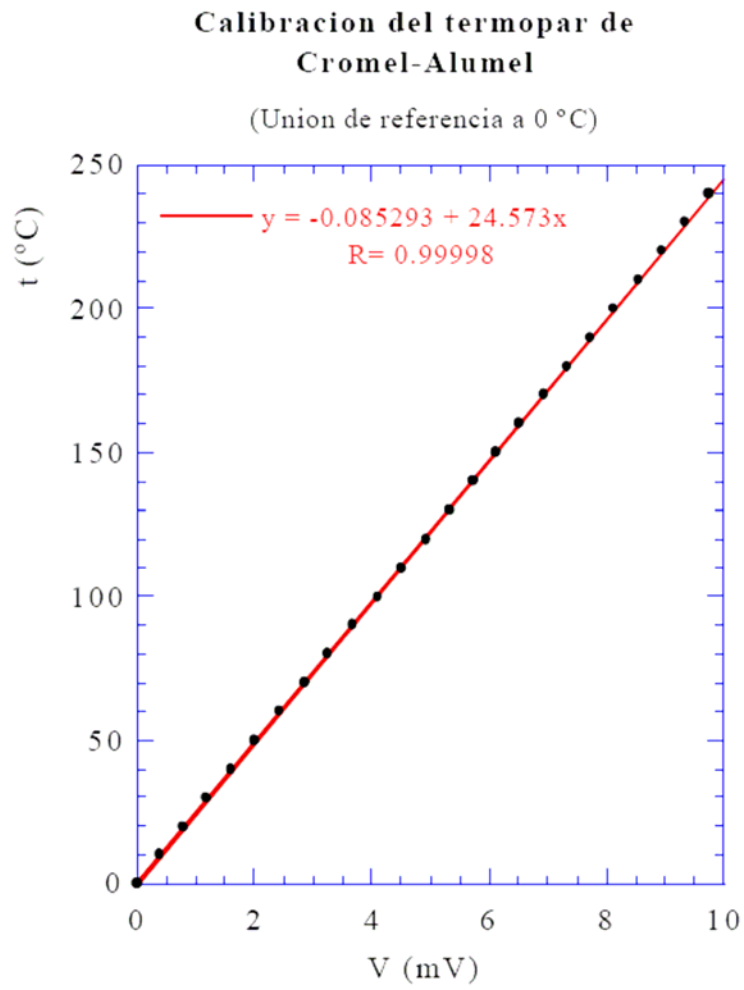


De la curva en temperatura se obtendrá, por **derivación gráfica a tramos**, la pendiente dT/dt , tanto de calentamiento como de enfriamiento.

A partir de las pendientes de las curvas de calentamiento y enfriamiento para la temperatura representativa de cada tramo, se obtiene la capacidad calorífica, según el método descrito en el apartado 1.2.

4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

- 4.1 Representar las curvas de calentamiento y enfriamiento de la resistencia y de cada material (temperatura en función del tiempo) en escala logarítmica para comprobar el carácter exponencial o no de la dependencia de la temperatura en función del tiempo.
- 4.2 Representar las curvas de calentamiento-enfriamiento de la resistencia y de cada material en escala lineal. Dividir la escala vertical en los tramos, trazando líneas horizontales, de manera que aparezcan claramente los tramos para los que se han realizado los ajustes lineales. La anchura de los tramos debe ser elegida de manera que tenga sentido hacer un ajuste lineal en la región de las curvas que determina cada tramo.
- 4.3 Calcular las pendientes de las tres curvas en cada tramo y calcular los valores de la capacidad calorífica total de la resistencia y del conjunto resistencia+muestra para ambas muestras, mediante la ecuación 6.16.
- 4.4 La capacidad calorífica de las muestras se obtendrá sustrayendo la de la resistencia. El calor específico se obtendrá dividiendo por la masa de cada muestra. Compararlos con los tabulados para el grafito y aluminio. Calcular también la capacidad calorífica molar.
- 4.4 Compara la dependencia de la capacidad calorífica obtenida con la esperada según el modelo de Debye (figura 6.1). Puede ser útil representar la capacidad calorífica molar frente a T ó T/Θ y situar sobre dicha curva los valores experimentales, verificando en que medida se acercan al valor de Dulong y Petit ($3R$) y observando si la temperatura de Debye del material es consistente con dicho valor.



NOMBRE:
FECHA:

GRUPO:

PRÁCTICA 3.- CAPACIDAD CALORÍFICA DE UN SÓLIDO

3.1 Representar las curvas de calentamiento-enfriamiento de la resistencia y de cada material en escala logarítmica. ¿Qué se puede comentar de la forma de dichas curvas?

3.2. Representar las curvas de calentamiento-enfriamiento de la resistencia y de cada material en escala lineal. Señala los tramos para los que se realizan los ajustes lineales.

NOMBRE:
FECHA:

GRUPO:

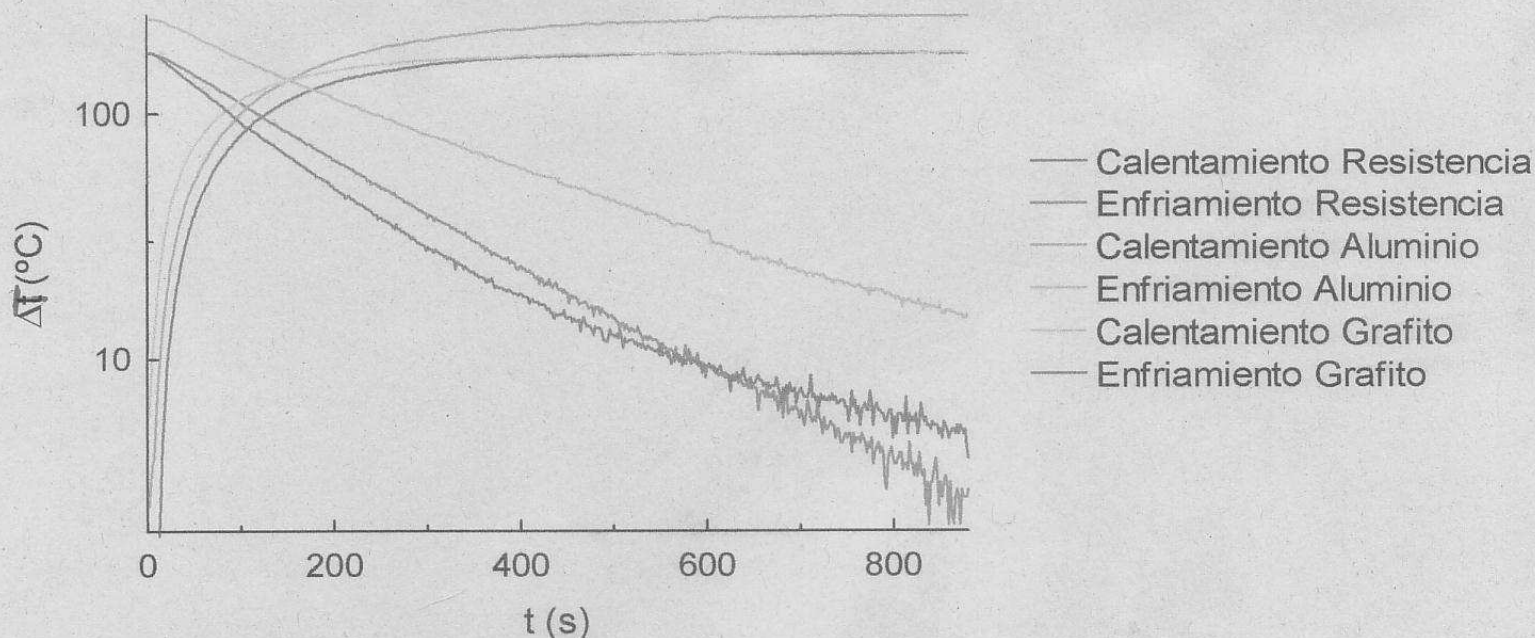
3.4 Representar los valores del calor específico y/o la capacidad calorífica molar en función de la temperatura de forma que sea posible discutir su variación con la temperatura en relación al modelo de Debye y comparar los valores obtenidos con los tabulados. ¿Que rango de temperaturas crees que se explora en cada uno de los casos?. Expresa los comentarios que consideres oportunos.

NOMBRE: FERNANDO HUESO GONZÁLEZ
FECHA: 3-11-2010

GRUPO: BL2

PRÁCTICA 3.- CAPACIDAD CALORÍFICA DE UN SÓLIDO

3.1 Representar las curvas de calentamiento-enfriamiento de la resistencia y de cada material en escala logarítmica. ¿Qué se puede comentar de la forma de dichas curvas?



3.2. Representar las curvas de calentamiento-enfriamiento de la resistencia y de cada material en escala lineal. Señala los tramos para los que se realizan los ajustes lineales.

↳ Ajustes realizados con Matlab, se pintan dichos ajustes, que se han centrado en los intervalos de temperatura que figuran en las tablas del apartado 3.3
↳ Ver gráficas adjuntas.

Respuestas 3.1:

Se observa que las curvas de enfriamiento siguen aproximadamente una recta (ley exponencial de enfriamiento), mientras que las de calentamiento no. Esto es lógico, pues:

$$\begin{aligned} \text{Cal: } \Delta T &\propto (1 - e^{-\alpha t}) \rightarrow \ln \Delta T \propto \ln(1 - e^{-\alpha t}) \rightarrow \text{No hay dependencia lineal } \ln \Delta T \propto t \\ \text{Enf: } \Delta T &\propto e^{-\alpha t} \rightarrow \ln \Delta T \propto -\alpha t \rightarrow \text{Sí hay dependencia lineal,} \end{aligned}$$

al representar escala logarítmica: pendiente negativa

Por otro lado, se observan distintas pendientes de las curvas, lo cual es lógico al tener cada material capacidades caloríficas distintas.

Además, se puede observar el ruido a bajas ΔT , cuando ya se ha enfriado del todo y la medida tiene más oscilaciones.

También se observa un cambio en la pendiente de enfriamiento del grafito, que indica que la ley exponencial es una primera aproximación al caso ideal y un salto en la recta del aluminio (ruido seguramente).

NOMBRE: FERNANDO HUESO GONZÁLEZ
 FECHA:

GRUPO: BL2

3.3 Tablas: Pendientes calculadas en los intervalos de temperatura elegidos, capacidad calorífica, calor específico y capacidad calorífica molar

Calculadas con Matlab con 20 puntos alrededor del centro del intervalo.

RESISTENCIA DE CALENTAMIENTO $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$

→ desconocemos el material de la resistencia

Potencia (W)	Intervalo de temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Pendientes $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$		C_R (J/K)	c (J/g K)	C_m (J/molK)
		m_C	m_E	$\pm 0,19$	$\pm 0,05$	
6,06 ± 0,11	15-25	0,991	-0,091	5,60	1,40	
"	35-45	0,961	-0,203	5,21	1,02	
"	55-65	0,884	-0,301	5,12	1,00	
"	75-85	0,762	-0,415	5,15	1,01	
"	95-105	0,573	-0,541	5,41	1,06	
"	115-125	0,443	-0,654	5,53	1,08	
"	135-145	0,250	-0,722	6,24	1,22	
"	155-165	0,130	-0,733	7,02	1,38	
"	170-175	0,038	-0,680	8,44	1,66	

Las variaciones son menores que el error.

ALUMINIO

$m_a = 26,98 \text{ g/mol}$

Potencia (W)	Intervalo de temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Pendientes $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$		C_{R-Al} (J/K)	$C_{R-Al} - C_R$	c (J/g K)	C_m (J/molK)
		m_C	m_E	$\pm 0,7$	$\pm 0,7 \text{ J/K}$	$\pm 0,03$	± 3
19,9 ± 0,3	15-25	1,12	-0,042	17,1	11,5	1,41	38
"	35-45	1,13	-0,129	15,9	10,7	1,30	35
"	55-65	1,03	-0,197	16,2	11,7	1,35	37
"	75-85	0,93	-0,230	17,1	12,0	1,46	39
"	95-105	0,83	-0,323	17,2	11,8	1,43	39
"	115-125	0,69	-0,425	17,9	12,3	1,50	41
"	135-145	0,61	-0,538	17,3	11,1	1,35	36
"	155-165	0,50	-0,633	17,5	10,5	1,28	35
"	170-175	0,39	-0,723	17,7	9,3	1,14	31

GRAFITO

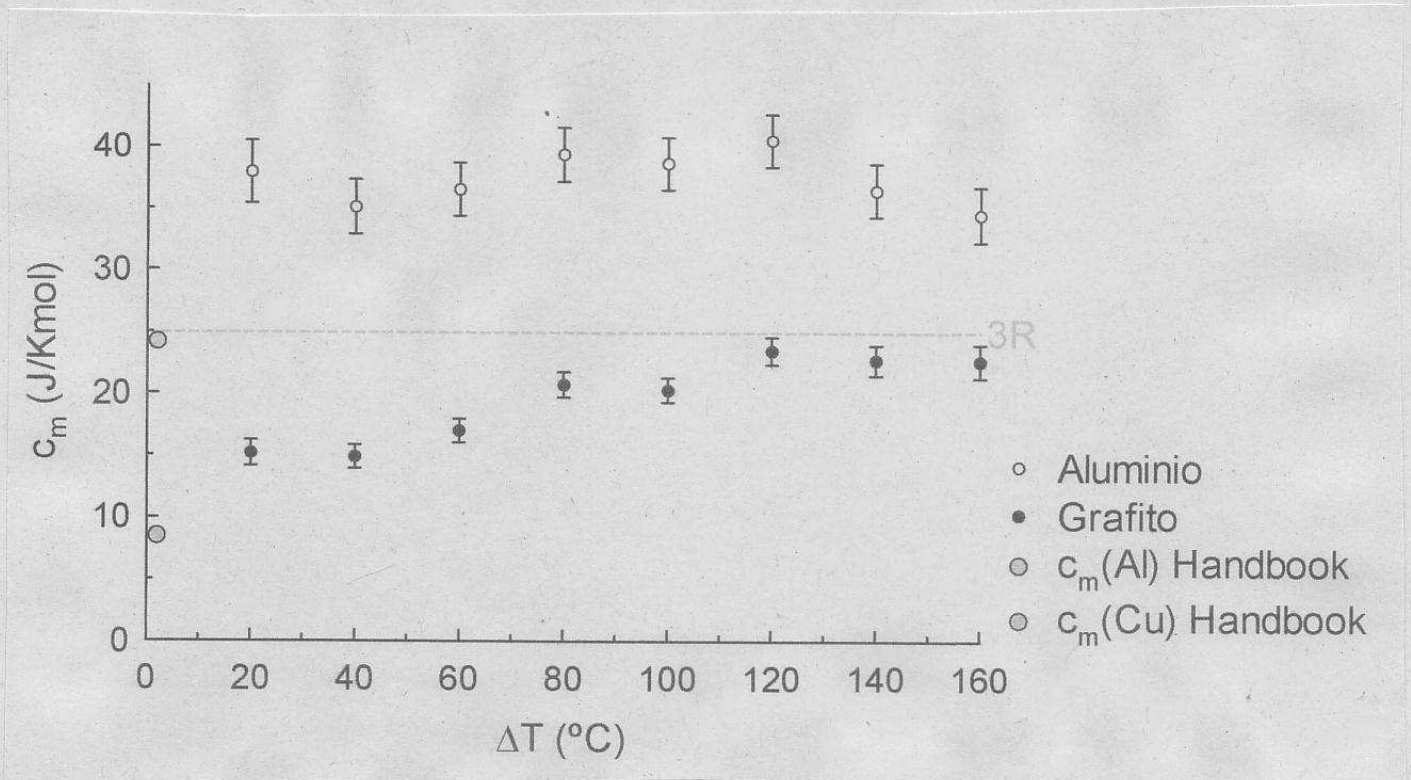
Potencia (W)	Intervalo de temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Pendientes $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$		C_{R-Gr} (J/K)	$C_{R-Gr} - C_R$	c (J/g K)	C_m (J/molK)
		m_C	m_E	$\pm 0,2$	$\pm 0,5 \text{ J/K}$	$\pm 0,10$	$\pm 1,5$
19,9 ± 0,3	15-25	1,58	-0,091	11,9	6,3	1,26	15,2
"	35-45	1,51	-0,237	11,4	6,2	1,24	14,9
"	55-65	1,25	-0,383	12,2	7,1	1,42	17,0
"	75-85	0,96	-0,484	13,8	8,6	1,72	20,7
"	95-105	0,71	-0,73	13,9	8,4	1,69	20,3
"	115-125	0,497	-0,81	15,3	9,8	1,95	23,5
"	135-145	0,271	-1,00	15,7	9,5	1,89	22,7
"	155-165	0,171	-1,04	16,4	9,4	1,88	22,6
"	170-175	0,032	-0,87	22,1	13,7	2,75	33

→ sobre 3.1.

Una explicación al cambio de pendiente en el grafito podría ser que las velocidades de enfriamiento de la resistencia y el grafito son distintas y que este efecto se hace más notable a bajas temperaturas.

Además, el aluminio se calienta a mayor temperatura (saturación a mayor ΔT) que resistencia y grafito.

3.4 Representar los valores del calor específico y/o la capacidad calorífica molar en función de la temperatura de forma que sea posible discutir su variación con la temperatura en relación al modelo de Debye y comparar los valores obtenidos con los tabulados. ¿Que rango de temperaturas crees que se explora en cada uno de los casos?. Expresa los comentarios que consideres oportunos.



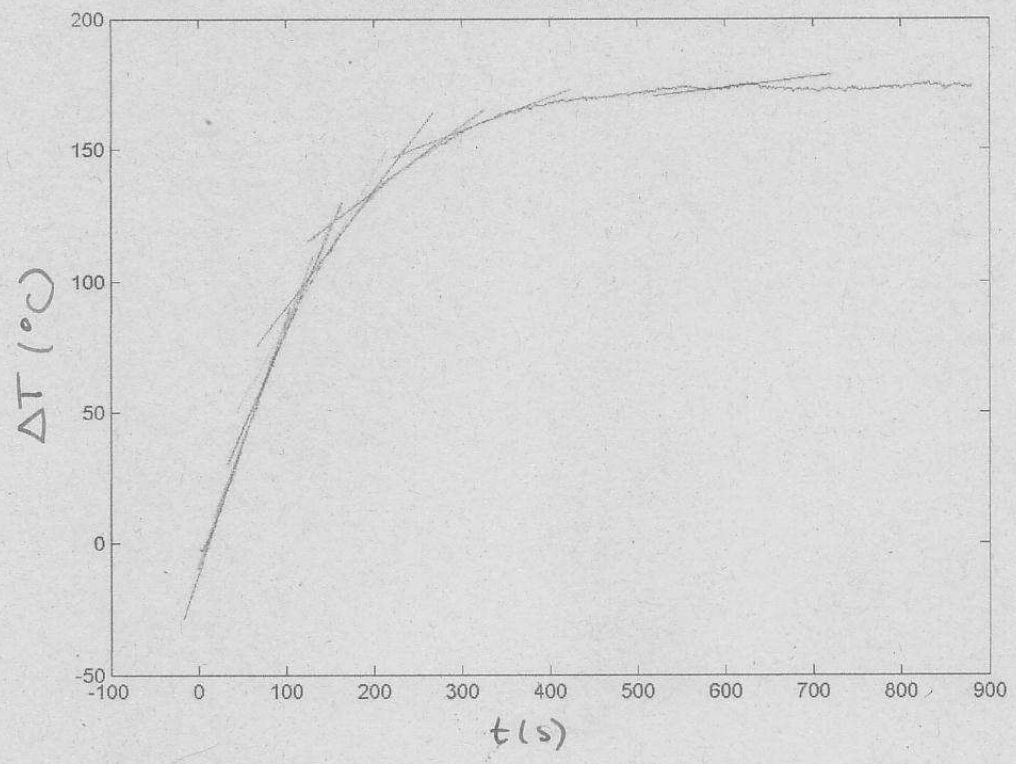
Para el aluminio se observa un valor aproximadamente constante, dentro de la incertidumbre experimental. Esto nos indica que estamos a temperaturas altas ($T \approx \Theta_0$), es decir, donde se tiende a la ley de Dulong y Petit. No obstante, la $C_{m,Al}$ supera el valor esperado según dicha ley ($3R$). Esto puede deberse a acumulación de errores por haberse verificado la capacidad de la resistencia (el valor de $C_{m,Al}$ depende enormemente de haber medido bien C_e para ese intervalo. Pese a todo, el valor de $3R$ está a dos o tres barnas de error, por lo que el resultado obtenido es consistente, del orden esperado dadas las incertidumbres experimentales. También cabe comentar que desconocemos la precisión con que se ha determinado la recta de calibración del termopar y las masas de las

nuestras, lo que constituiría un error añadido que no hemos podido tener en cuenta en la propagación de errores (al no ser medidas nuestras, desconocemos la precisión real). Comparando con valores del Handbook of Chemistry and Physics, el valor de $C_m(25^\circ\text{C}) = 24,2 \text{ J/Kmol}$, valor muy cercano a $3R \approx 24,9 \text{ J/Kmol}$. Es decir que la comparación con $3R$ ha sido adecuada. La temperatura de Debye del aluminio es 428K , es decir, en la gráfica estaría a mitad del eje AT , por lo que estamos tendiendo ya al valor $3R$.

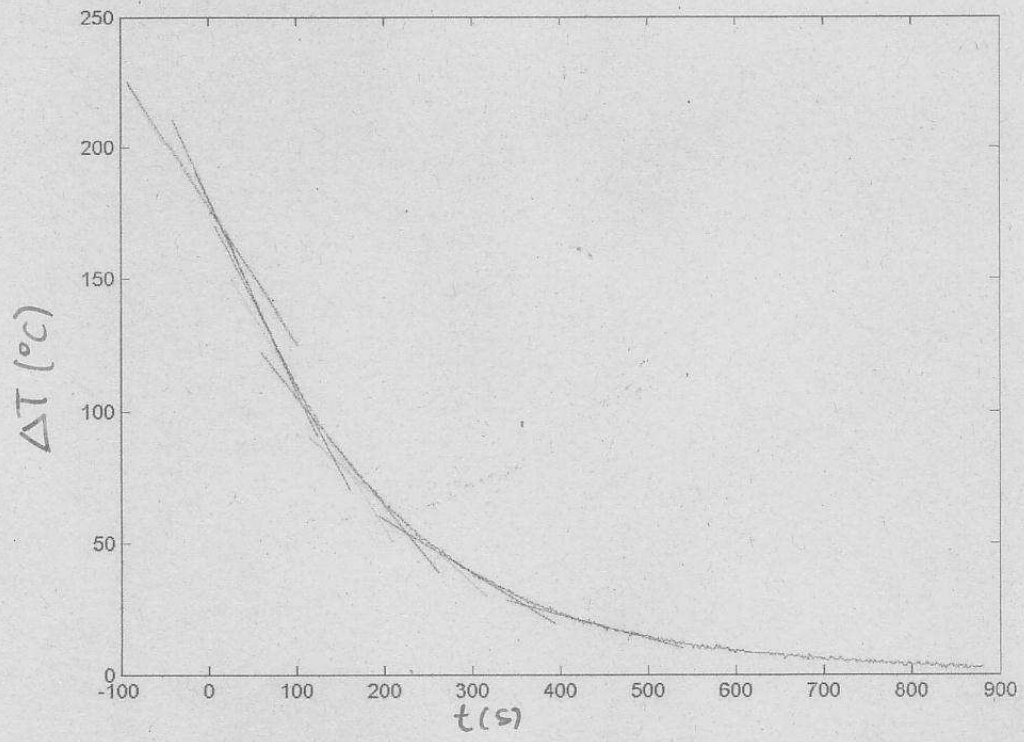
En cuanto al grafito, vemos que hay una tendencia ascendente apreciable a mayor temperatura, lo que indica que estamos a temperaturas menores de la de Debye, donde la pendiente de la curva es grande y todavía no se alcanza $3R$. Esto es consistente con los datos tabulados, pues $\Theta_D = 2230\text{K}$. No obstante, hay una desviación respecto al valor del Handbook: $8,5 \text{ J/Kmol}$, de nuevo un "shift" como en el aluminio hacia arriba. Esto confirma que tenemos un error sistemático en nuestro procedimiento experimental (por ejemplo a la hora de restar C_r).

En definitiva, se estudian distintos rangos de temperatura en cada caso ($T < \Theta_{\text{grafito}}$; $T \approx \Theta_{\text{Alu}}$) y se obtienen resultados algo imprecisos pero con un comportamiento y orden de magnitud consistentes con los datos experimentales.

Calentamiento Resistencia

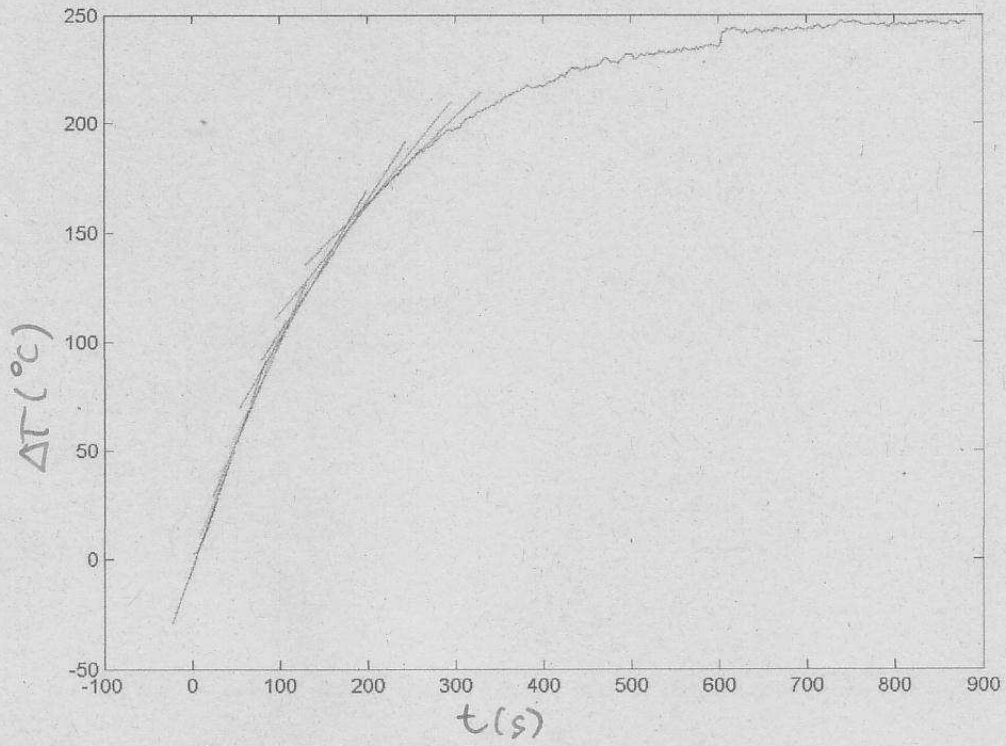


Enfriamiento Resistencia

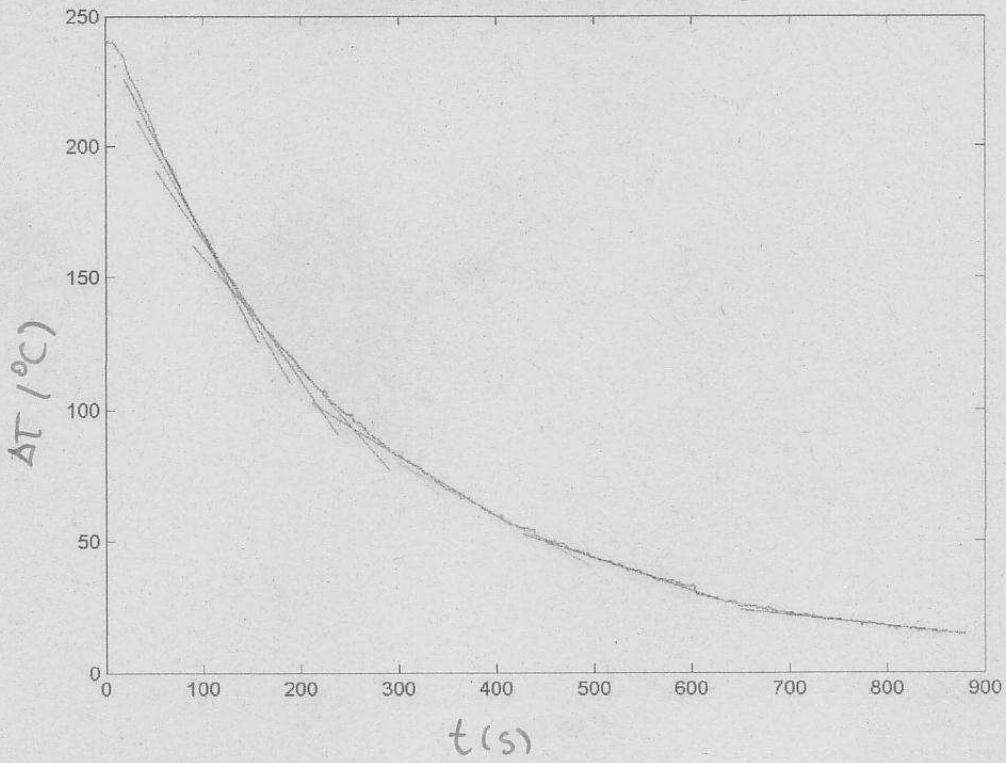


Despreciamos el ajuste en 175°C por no ajustar el programa a la recta dado el ruido de la señal.

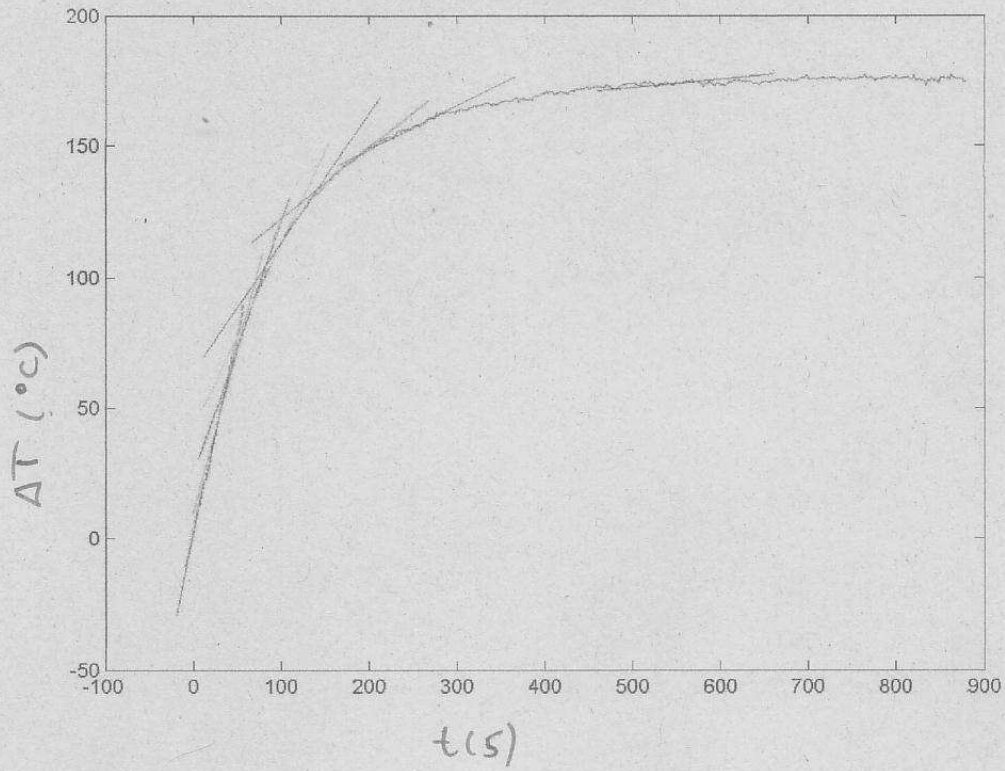
Calentamiento Aluminio



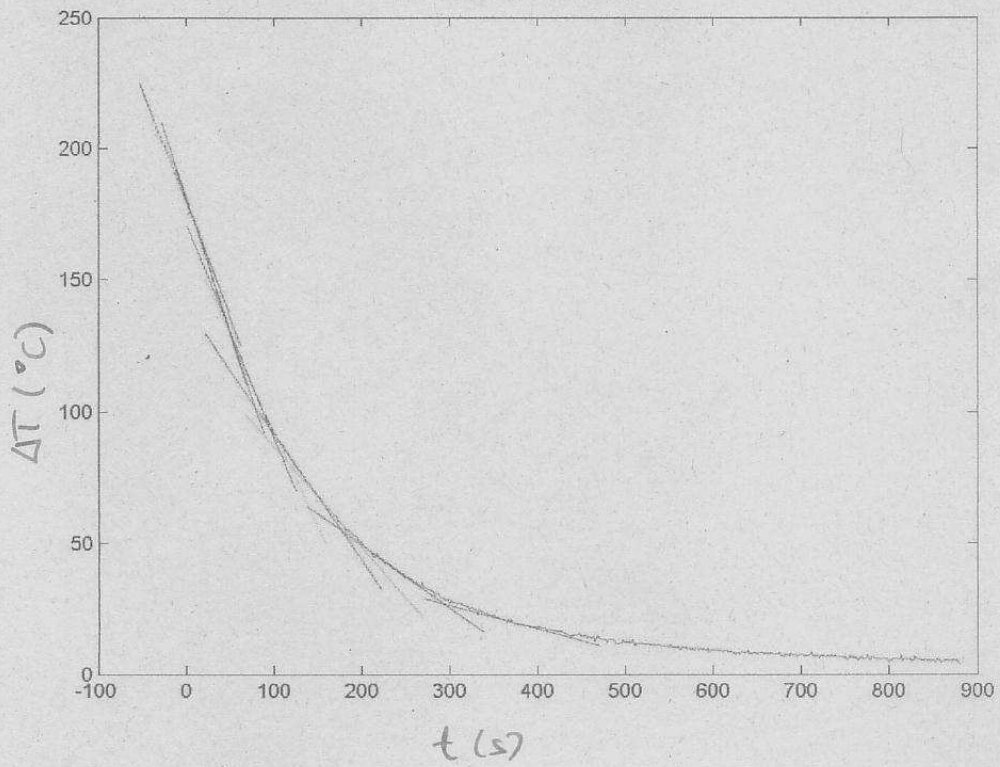
Enfriamiento Aluminio

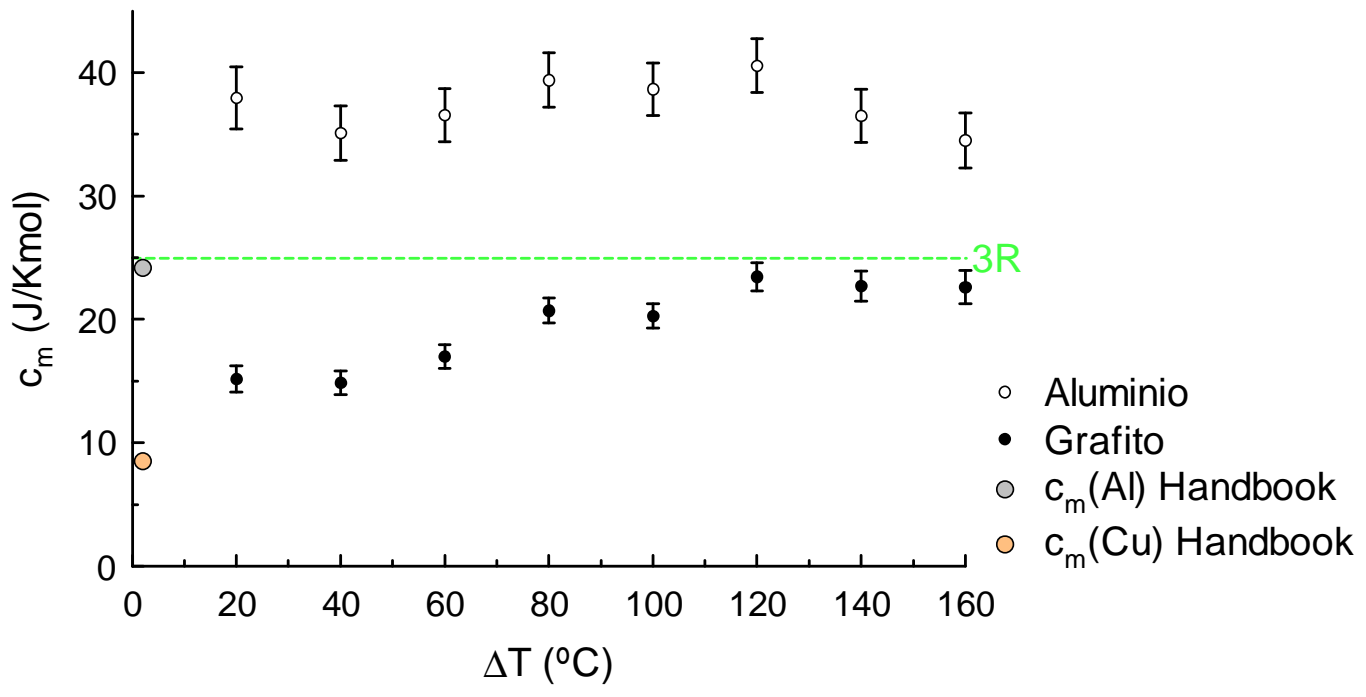
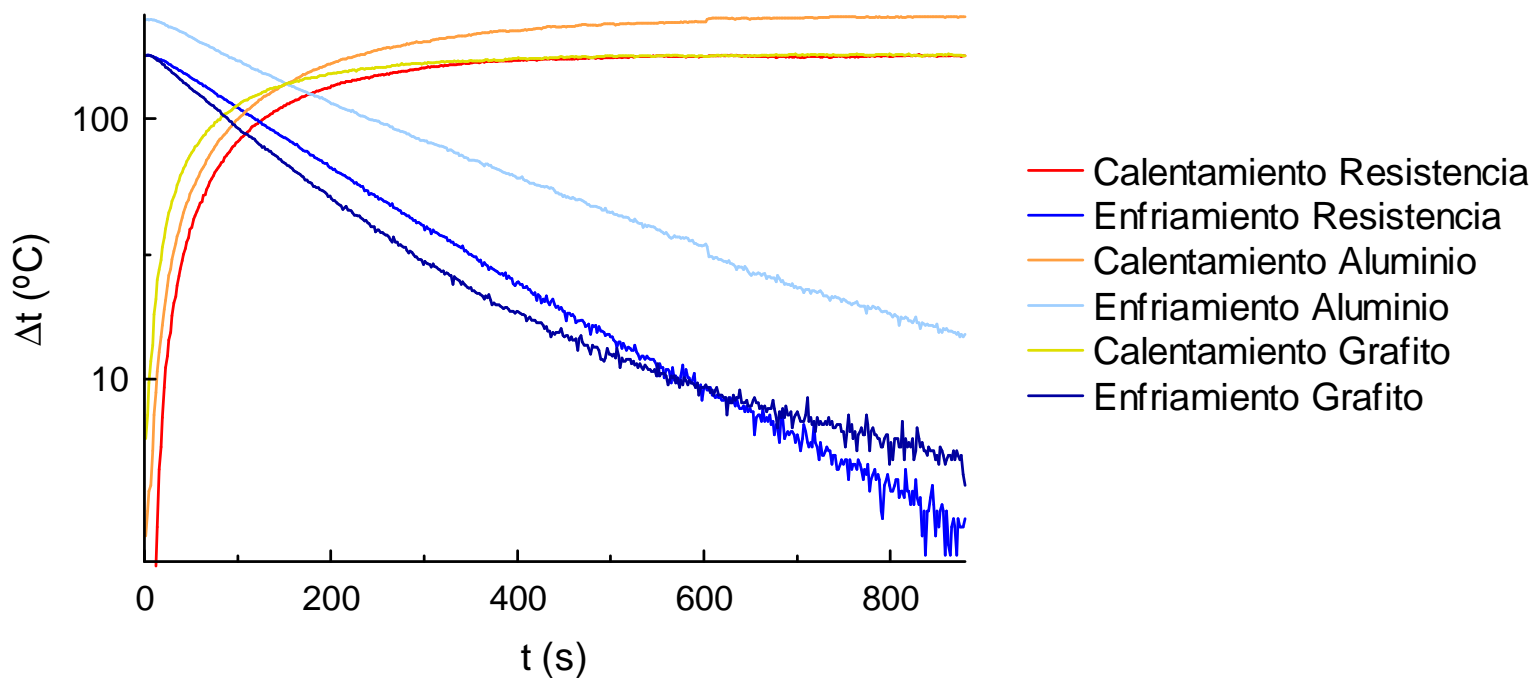


Calentamiento Grafito

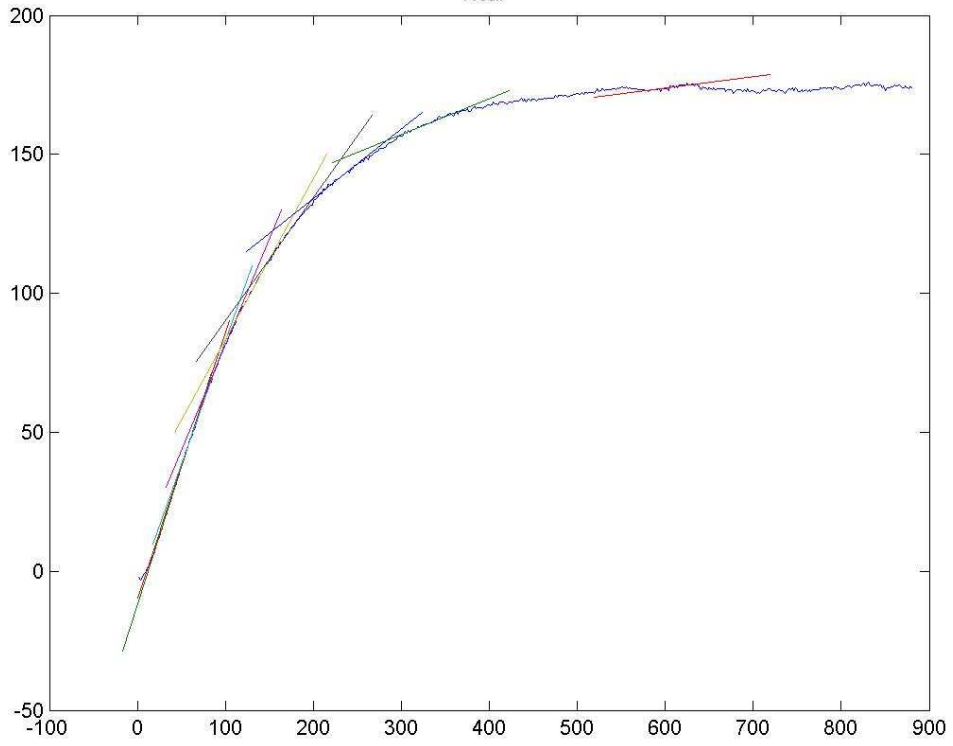


Enfriamiento Grafito

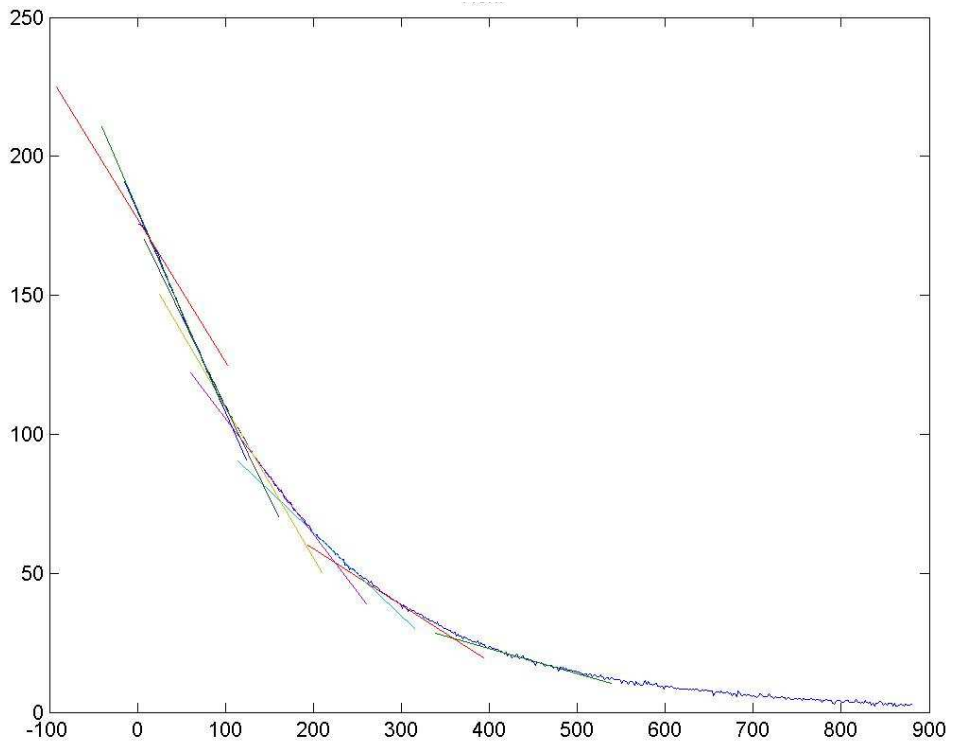




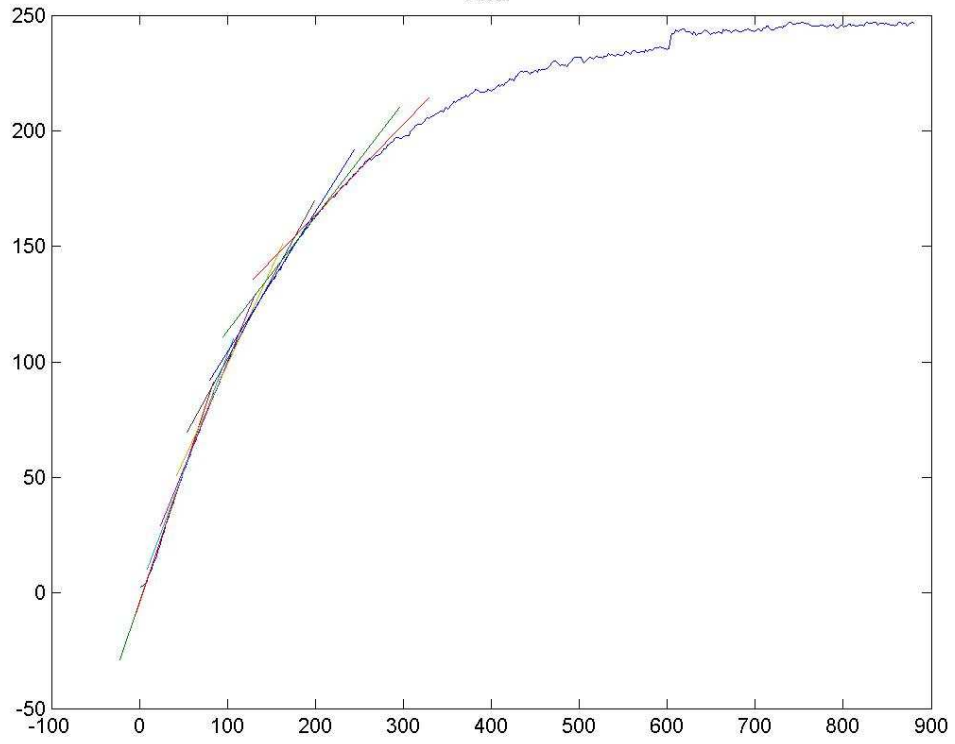
Calentamiento Resistencia



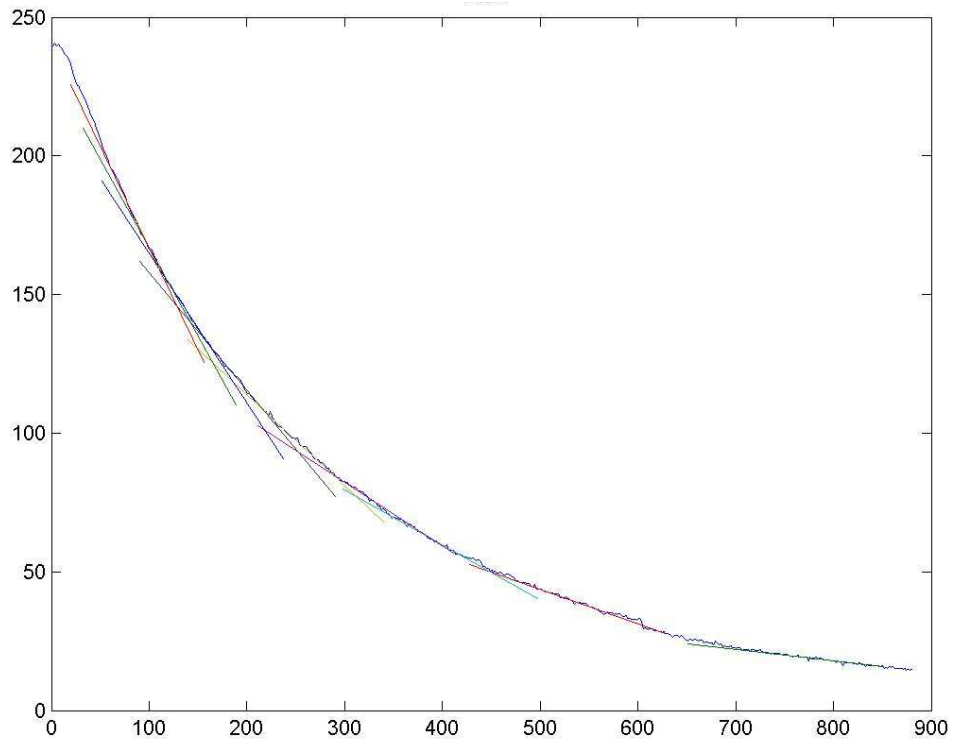
Enfriamiento Resistencia



Calentamiento Aluminio



Enfriamiento Aluminio



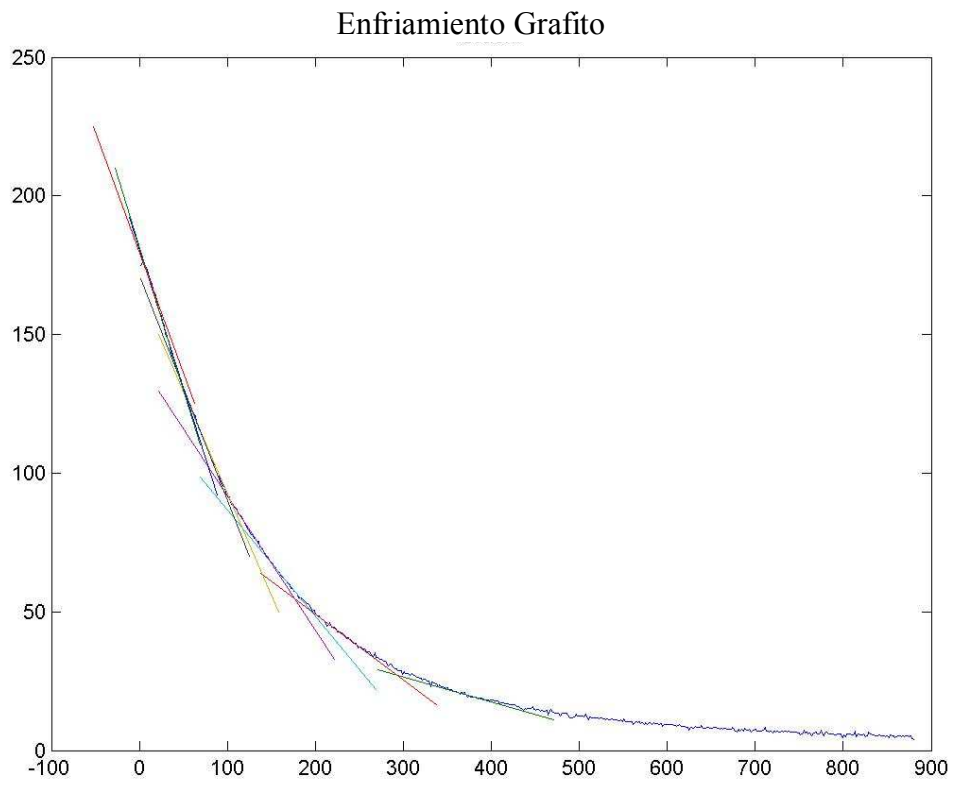
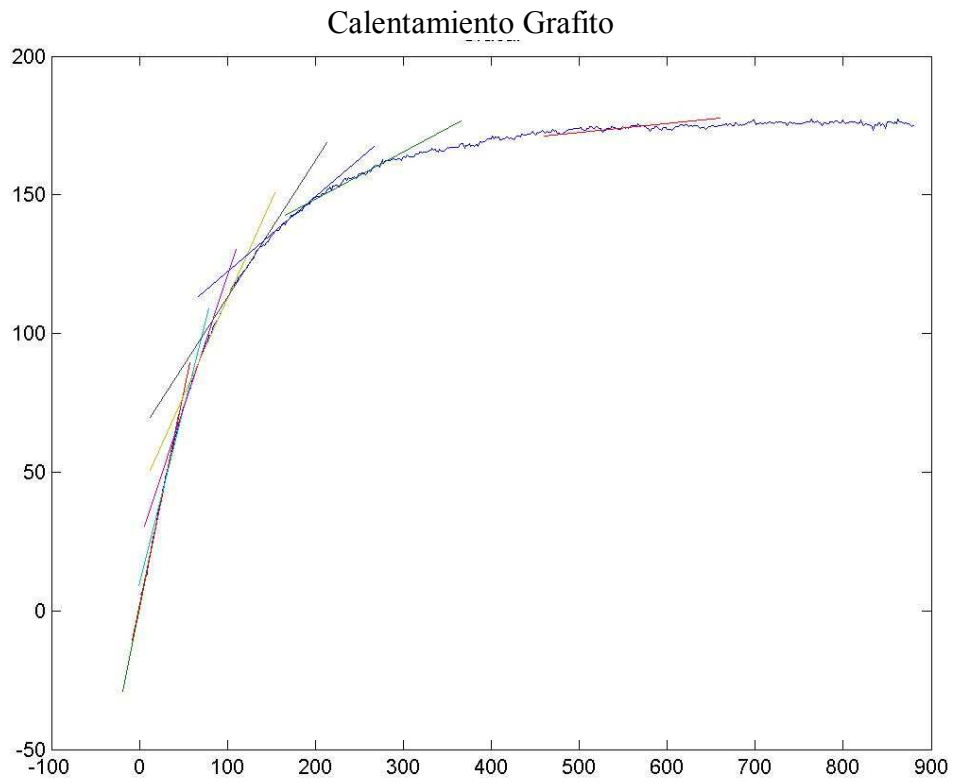


Tabla Heat Capacity extraída del Handbook (ver mi web para saber cómo entrar por VPN)

HEAT CAPACITY OF THE ELEMENTS AT 25 °C

This table gives the specific heat capacity (c_p) in J/g K and the molar heat capacity (C_p) in J/mol K at a temperature of 25 °C and a pressure of 100 kPa (1 bar or 0.987 standard atmospheres) for all the elements for which reliable data are available.

Name	c_p J/g K	C_p J/mol K	Name	c_p J/g K	C_p J/mol K
Actinium	0.120	27.2	Molybdenum	0.251	24.06
Aluminum	0.897	24.20	Neodymium	0.190	27.45
Antimony	0.207	25.23	Neon	1.030	20.786
Argon	0.520	20.786	Nickel	0.444	26.07
Arsenic	0.329	24.64	Niobium	0.265	24.60
Barium	0.204	28.07	Nitrogen (N ₂)	1.040	29.124
Beryllium	1.825	16.443	Osmium	0.130	24.7
Bismuth	0.122	25.52	Oxygen (O ₂)	0.918	29.378
Boron	1.026	11.087	Palladium	0.246	25.98
Bromine (Br ₂)	0.474	75.69	Phosphorus (white)	0.769	23.824
Cadmium	0.232	26.020	Platinum	0.133	25.86
Calcium	0.647	25.929	Potassium	0.757	29.600
Carbon (graphite)	0.709	8.517	Praseodymium	0.193	27.20
Cerium	0.192	26.94	Radon	0.094	20.786
Cesium	0.242	32.210	Rhenium	0.137	25.48
Chlorine (Cl ₂)	0.479	33.949	Rhodium	0.243	24.98
Chromium	0.449	23.35	Rubidium	0.363	31.060
Cobalt	0.421	24.81	Ruthenium	0.238	24.06
Copper	0.385	24.440	Samarium	0.197	29.54
Dysprosium	0.173	28.16	Scandium	0.568	25.52
Erbium	0.168	28.12	Selenium	0.321	25.363
Europium	0.182	27.66	Silicon	0.712	19.99
Fluorine (F ₂)	0.824	31.304	Silver	0.235	25.350
Gadolinium	0.236	37.03	Sodium	1.228	28.230
Gallium	0.373	26.03	Strontium	0.306	26.79
Germanium	0.320	23.222	Sulfur (rhombic)	0.708	22.70
Gold	0.129	25.418	Tantalum	0.140	25.36
Hafnium	0.144	25.73	Tellurium	0.202	25.73
Helium	5.193	20.786	Terbium	0.182	28.91
Holmium	0.165	27.15	Thallium	0.129	26.32
Hydrogen (H ₂)	14.304	28.836	Thorium	0.118	27.32
Indium	0.233	26.74	Thulium	0.160	27.03
Iodine (I ₂)	0.214	54.43	Tin (white)	0.227	26.99
Iridium	0.131	25.10	Titanium	0.523	25.060
Iron	0.449	25.10	Tungsten	0.132	24.27
Krypton	0.248	20.786	Uranium	0.116	27.665
Lanthanum	0.195	27.11	Vanadium	0.489	24.89
Lead	0.130	26.84	Xenon	0.158	20.786
Lithium	3.582	24.860	Ytterbium	0.155	26.74
Lutetium	0.154	26.86	Yttrium	0.298	26.53
Magnesium	1.023	24.869	Zinc	0.388	25.390
Manganese	0.479	26.32	Zirconium	0.278	25.36
Mercury	0.140	27.983			