

Curva de enfriamiento de los peloides españoles - Propiedades térmicas

Francisco ARMIJO CASTRO y Onica ARMIJO SUAREZ

Cátedra de Hidrología Médica - Facultad de Medicina - UCM
farmijoc@med.ucm.es

RESUMEN

Uno de los usos terapéuticos más importantes de los peloides es la aplicación de calor. El uso racional de estos productos, fuera de empirismos seculares, debe fundamentarse en el estudio de sus propiedades térmicas. En este trabajo hemos estudiado la capacidad calorífica, la conductividad y retentividad térmica y las curvas de cesión de calor de cinco peloides.

Palabras clave: Peloides, termoterapia, capacidad calorífica, conductividad térmica, retentividad, curvas de enfriamiento.

Cooling curve of spanish peloids - thermal properties

ABSTRACT

Heat application is one of the most important therapeutic uses of peloids. The rational use of these products, free of century's empirical approach, must be based on the study of their thermal properties. This paper studies the calorific capacity, the conductivity and thermal retention and the heat yield graphic of five peloids.

Key words: Peloids, thermotherapy, calorific capacity, thermal conductivity, thermal retention, cooling curves

INTRODUCCION

De acuerdo con varios autores como Prat y Brozek la termoterapia es la acción principal de la peloterapia, por tanto el estudio de las propiedades térmicas de estos materiales es imprescindible para el conocer sus posibles efectos terapéuticos¹.

El calor es una de las formas de energía y de acuerdo con los principios de la termodinámica, el calor que se aplica a un sistema se utiliza en aumentar su energía interna y en la realización de un trabajo externo; por lo tanto la cantidad de calor debe medirse en las mismas unidades en las que se mide la energía y el

trabajo. De aquí que la ecuación de dimensiones de la cantidad de calor sea la misma que la del trabajo y que su unidad sea el julio, no obstante sigue utilizándose la caloría clásica²:

$$[Q] = L^2 M T^{-2}$$

La capacidad calorífica o térmica de un sistema se define como la cantidad de calor que es necesario aportar para elevar un grado la temperatura de un gramo de peloide. En unidades S.I. se expresa en J/(kg K), aunque también todavía es muy utilizada la cal/ g °C.

Cuando se refiere a un gramo de una sustancia se denomina calor específico y capacidad calorífica cuando se refiere a un sistema heterogéneo como es el caso de los peloides.

En el caso del agua pura, el valor del calor específico es $4,18 \cdot 10^{-3}$ J/ (kg K), a 20 °C, superior a cualquier otro líquido o sólido con la excepción de algunos derivados del litio.

Los compuestos sólidos que entran a formar parte de los peloides (como la arcilla, el óxido de aluminio, el óxido de hierro, el óxido de magnesio...) tienen un calor específico entre 4 y 6 veces menor que el agua³. (Tabla 1)

Tabla 1: Capacidad calorífica a presión ambiente

Sustancia	Capacidad Calorífica (cal/ g °C)	Intervalo de Temperatura (°C)
Agua	1	20
Agua (Hielo)	0.5	0
Carbón Vegetal	0.24	20
Azufre Sólido	0.17	P fusión
Lana de vidrio	0.16	20
Arena	0.19	20
Celulosa	0.32	20
Acero	0.12	20
Arcilla	0.23	20

La capacidad calorífica en los peloides es tanto más baja cuanto mayor es el componente mineral, por tanto está relacionada de forma directa con la hidratación e inversa con la humificación.

Cuanto más elevado sea el componente líquido del peloides tanto mayor será su calor específico, coincidiendo el valor máximo con la saturación de su capacidad de agua.

El calor específico se expresa mediante la fórmula:

$$C_{\text{esp}} = 1/m \, dQ/dt$$

En la que m es la masa del cuerpo, Q la cantidad de calor y t es la temperatura. La ecuación de dimensiones del calor específico es:

$$[C_{\text{esp}}] = L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$$

La capacidad calorífica por gramo (c) de un peloides puede ser determinada a partir de su porcentaje en agua (A) y en cenizas (C), utilizando la fórmula⁴.

$$c = 1260,23 + 29,26A - 6,28C + 0,063CA$$

En la peloidoterapia se utiliza también otra magnitud física similar: la capacidad calorífica volumétrica, que se define como la cantidad de calor que es necesario aportar o extraer para elevar o disminuir un grado, la unidad de volumen de una sustancia dada. Su unidad en el S.I. es J/(m³.K). La capacidad calorífica es función de su composición en agua y cenizas. $c = f(A, C)$.

Su ecuación de dimensión es:

$$[C_{\text{vol}}] = L^{-1} M T^{-2} \Theta^{-1}$$

La capacidad calorífica volumétrica y el calor específico están relacionados por la ecuación:

$$C_{\text{vol}} = C_{\text{esp}} \cdot \rho$$

En la que ρ es la densidad, masa de la unidad de volumen, cuya ecuación de dimensiones es:

$$[\rho] = L^{-3} M$$

y cuya unidad es en SI, Kg/m³

La densidad de un peloides viene dada por la densidad del agua, ρ_0 , y la de sus componentes sólidos ρ_1 , mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{100}{\frac{S}{\rho_1} + \frac{A}{\rho_0}}$$

La densidad del conjunto de los componentes sólidos podemos expresarla como una función del contenido en cenizas C dado en % (p/p) .La ecuación que nos permite calcularla es:

$$\rho_1 = 1,49 \cdot 10^3 + 5C^{1,155}$$

A partir de las propiedades térmicas de los peloides podremos calcular las posibles acciones que producen cuando se encuentran incluidos en un proceso termoterápico.

El transporte de calor tiene su origen en un gradiente de temperatura, magnitud conocida como «fuerza» en la termodinámica de los procesos irreversibles. Esta «fuerza» origina un flujo o corriente de calor. El gradiente de temperatura viene expresado por la ecuación: ⁵.

$$\text{grad } dT = dT / dl$$

En la que T es la temperatura y l la distancia a lo largo del flujo. La ecuación de dimensiones será:

$$[\text{grad } T] = L^{-1} \Theta$$

y la unidad el K/m

A la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo en la dirección de la caída de temperaturas se la denomina flujo calorífico o térmico y se expresa mediante la ecuación:

$$\Phi = dQ/dt$$

Siendo su ecuación de dimensiones:

$$[\Phi] = L^2 M T^{-3}$$

Que coincide con las dimensiones de la potencia y su unidad en sistema S.I., es el Φ pero también se utiliza la cal /minuto.

La ley fenomenológica que describe el fenómeno del transporte de calor es la de Fourier, que podemos expresar como.

$$\Phi = dQ/dt = -\lambda S dT/dl$$

En donde S es la sección transversal al flujo y λ el coeficiente de conductividad termica.

El Coeficiente Conductividad Termica se define como la cantidad de calor, que por unidad de superficie y unidad de tiempo, atraviesa un plano perpendi-

cular al gradiente de temperatura, cuando este es igual a la unidad. Se expresa en W/(m K) y la ecuación de dimensiones es:

$$[\lambda] = L M T^{-3} \Theta^{-1}$$

se puede obtener por cálculo utilizando la ecuación:

$$\lambda = 2,85 \cdot 10^{-2} + 7,74 \cdot 10^{-3} C + 5,11 \cdot 10^{-3} A - 7,74 \cdot 10^{-5} CA$$

Otro parámetro térmico es el llamado *coeficiente de conductibilidad de la temperatura*, también llamado *difusividad térmica*, que es igual a la elevación de la temperatura en la unidad de tiempo cuando la variación del gradiente en la unidad de longitud es igual a la unidad. También y de manera más sencilla se dice que es igual a la elevación de temperatura que experimentará la unidad de volumen de la sustancia cuando se le comunica una cantidad de calor numéricamente igual al coeficiente de conductividad térmica

$$[a] = [\lambda] / [C_{\text{esp}}] [Q]$$

La unidad es el m²/s y la ecuación de dimensiones es:

$$[a] = L^2 T^{-1}$$

En la tabla siguiente se reúnen valores de los dos coeficientes anteriores de varias sustancias relacionadas con los peloides. (Tabla 2)

Tabla 2: Coeficientes de Conductividad Térmica

Sustancia	Coeficiente Conductividad Térmica λ , W/m K	Coeficiente de Conductibilidad de temperatura. $a \times 10^6$, m ² /s	Temperatura °C
Agua	0,5513	0,131	0
Asbesto	0,1163	0,186	30
Madera de roble	0,207	0,147	20
Tierra húmeda	0,657	0,192	17
Carbón	0,186	0,103	20
Hielo	2,26	1,08	0
Arena seca	0,326	2,74	20
Mica	0,582	2,28	20
Corcho	0,0419	0,117	27

Por otra parte Judd Lewis introdujo en el campo de la peloidoterapia el concepto de retentividad que viene dada por la expresión:

$$R = 1/a = C_{vol}/\lambda$$

En su trabajo Lewis expresó la Retentividad como la razón entre el potencial y la conductividad térmicos. El potencial térmico viene dado por el producto del calor específico por el peso específico. Se define como el tiempo que tarda la unidad de volumen de un peloide en disminuir un grado su temperatura, cuando la pérdida de calor por segundo es numéricamente igual al coeficiente de conductibilidad térmica⁶.

Se expresa en s/m² y la ecuación de dimensiones es

$$[R] = T L^{-2}$$

Se obtiene por cálculo utilizando los valores de C_{vol} y λ anteriormente calculadas

La cesión de calor de los peloides al usuario se rige por la ley del enfriamiento de Newton, en la que la velocidad de pérdida de temperatura de un cuerpo caliente es proporcional a la diferencia entre su propia temperatura y la del medio ambiente o foco frío⁷.

En nuestro caso el foco frío es el propio paciente que mantiene fisiológicamente su temperatura constante a unos 37°C.

La ley de Newton sigue la ecuación diferencial:

$$dT/dt = -k (T - T_0)$$

En la que:

T es la temperatura instantánea del cuerpo que se enfría, el peloide en nuestro caso, T_0 es la temperatura del foco frío, en este caso el paciente y k es una constante que define el ritmo de enfriamiento.

La solución a esta ecuación diferencial es:

$$T(t) = T_0 + A e^{-kt}$$

En la que:

A es la amplitud térmica, diferencia entre la temperatura inicial del cuerpo caliente, el peloide, y la del foco frío, el sujeto.

k será igual a $1/t_r$ donde t_r en mecánica y electricidad se denominan *tiempo de relajación*, y así lo usaremos aquí, y se define como el tiempo necesario para que una magnitud en decrecimiento exponencial disminuya su valor inicial, T_i , en un 63,22 % de la amplitud A. Sustituyendo resultará:

$$T(t) = T_0 + A e^{-t/t_r}$$

Esta ecuación no tiene máximos ni mínimos ni puntos de inflexión porque sus derivadas primera y segunda solo se anulan para t igual a infinito, su curva representativa debe tener una tangente con pendiente negativa en el origen.

La ecuación de Newton se cumple cuando la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío no es demasiado grande como ocurre en los peloides.

La temperatura T_r , alcanzada al llegar al tiempo de relajación t_r será:

$$T_r = T_0 + A/e$$

El cálculo del calor total cedido por un material vendrá dado por la ecuación:

$$Q_{\text{total}} = -m C_{\text{esp}} A$$

Y el calor proporcionado entre el principio del enfriamiento cuando la temperatura es T_i y al alcanzar el *tiempo de relajación*, cuando es T_r será:

$$Q_1 = -m C_{\text{esp}} (T_i - T_r)$$

Que puede expresarse como:

$$Q_1 = -m C_{\text{esp}} A (1-1/e)$$

MATERIAL Y METODO

Materiales

En las determinaciones realizadas se han utilizado, además del material de vidrio usual en el laboratorio los equipos que se indican a continuación.

Baño termostático, marca Lauda, modelo RC3, para la curva de enfriamiento.

Baño termostático, marca Lauda, modelo E-100, para la curva de enfriamiento.

Termopar, marca Cole-Parmer, modelo 91100-50, para la curva de enfriamiento.

Material informático

Además del software propio de los equipos instrumentales se ha utilizado el que se indica a continuación.

Programa Origin, para el cálculo de la ecuación de las curvas de enfriamiento.

Muestras de peloides

En el presente trabajo se han analizado muestras de 5 peloides que denominamos P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5 .

Métodos analíticos

Toma de muestras y conservación

En el lugar de origen se toma una porción homogénea de peloide y se introduce en un envase de plástico de 15 L de capacidad. Se conserva en nevera a 4°C hasta su análisis.

Preparación de muestras

Previamente se retiran los materiales gruesos, hojas o piedras caídas accidentalmente, que consideramos no forman parte del peloide.

Las muestras se mezclan por agitación en el propio recipiente de muestreo para homogeneizarlas.

Determinación de curvas de enfriamiento

Siguiendo la técnica de A. Rambaud, se han obtenido las curvas de enfriamiento de los diferentes peloides⁸.

Se prepara un recipiente de poliestireno de 250 cm³ con tapa de rosca y un orificio central. Se llena con la muestra eliminando las burbujas de aire.

Se introduce la sonda de temperatura por el orificio de la tapa y se lleva a un baño termostático a 45°C. Cuando la sonda alcanza esta temperatura el recipiente se mantiene 30 minutos en el baño para conseguir la homogeneización térmica de la muestra y luego se introduce en otro baño termostático a 36°C.

Mediante un termómetro con sonda Pt 100 se monitoriza la temperatura del barro en intervalos de 15 segundos hasta que alcance los 37°C.

Se construye la curva tiempo *vs* temperatura y se halla la ecuación que mejor se ajusta a dicha curva experimental.

Se obtienen los valores cada una de las constantes de la ecuación para cada muestra. A partir de la misma se calcula el valor de tiempo necesario para que el peloide alcance 37°C.

RESULTADOS

Exponemos los resultados obtenidos en la medición de estos parámetros

Propiedades Térmicas

Hemos utilizado para el calculo de estos parámetro los valores del % componente sólido, agua y cenizas y las ecuaciones anteriormente citadas.

Tabla 3. Propiedades térmicas

PARAMETRO	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Capacidad Calorífica (J/kgK)	3407	1902	2949	2033	2217
Capacidad Calorífica Volumétrica (10 ⁶ J/m ³ K)	3.80	2.97	3.52	3.04	3.16
Coefficiente de Conductividad Térmica (W/mK)	0.456	0.531	0.404	0.489	0.480
Retentividad Calórica (10 ⁶ s/m ²)	8.33	5.59	8.71	6.21	6.60

Curvas de enfriamiento, Variación de la Temperatura del peloide con el Tiempo

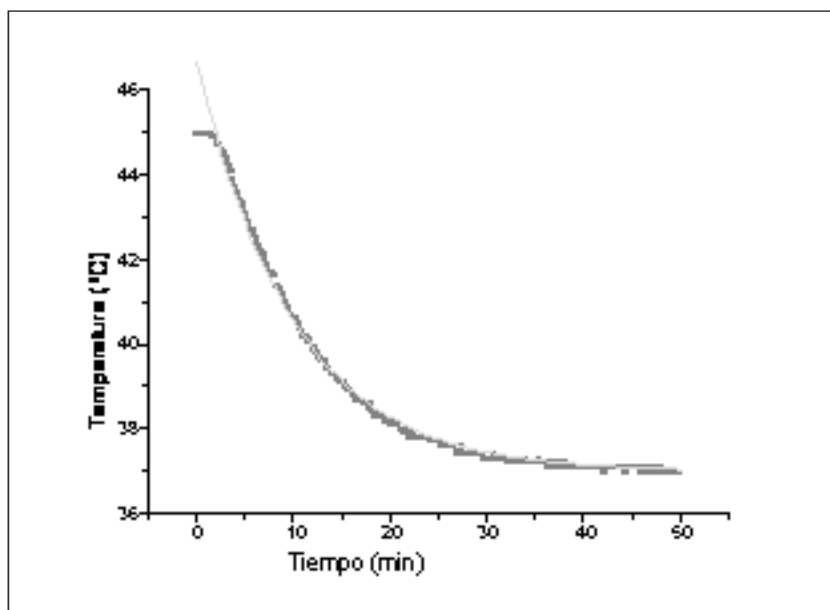
Figura 1: Curva cesión temperatura peloide P₁

Figura 2: Curva cesión temperatura peloide P2

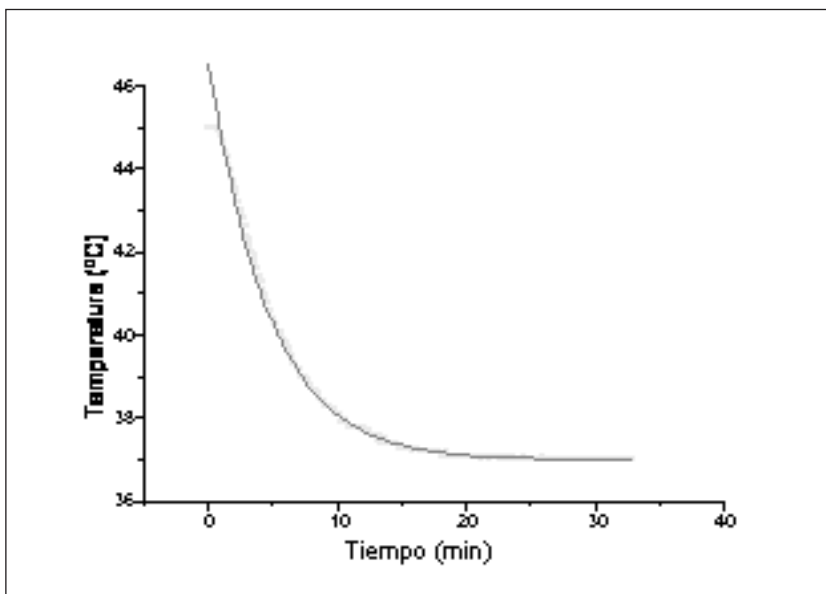


Figura 3: Curva cesión temperatura peloide P3

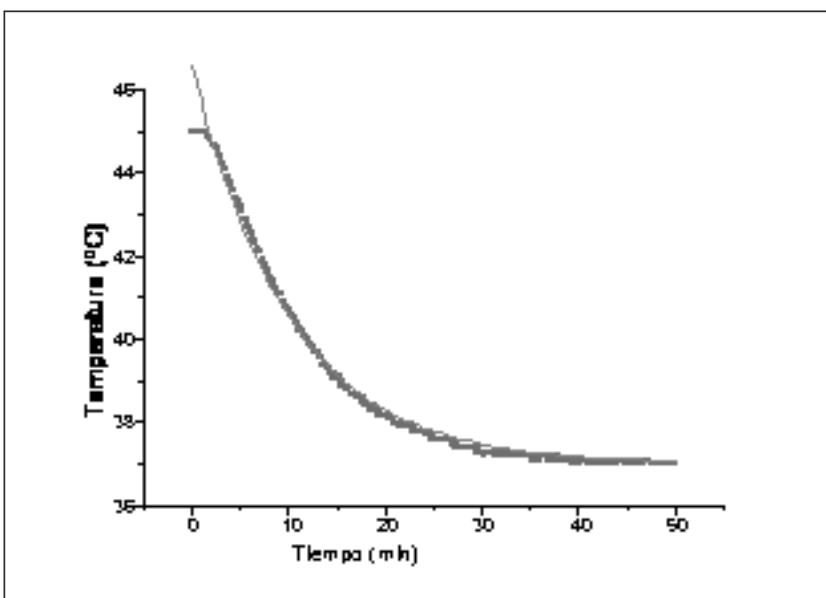


Figura 4: Curva cesión temperatura peloide P₄

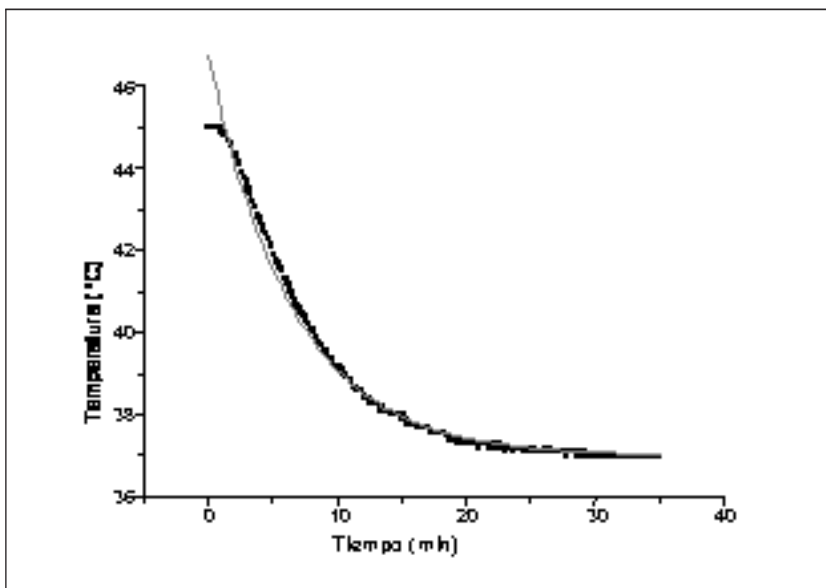
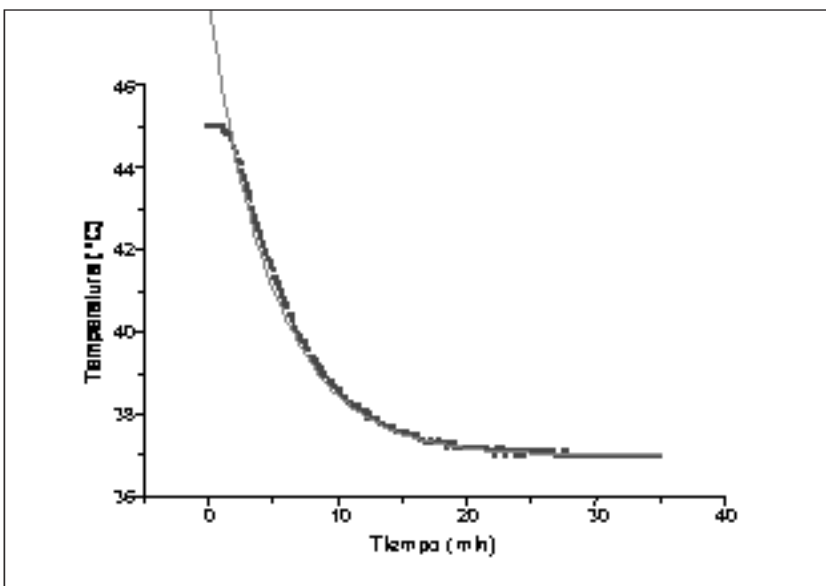


Figura 5: Curva cesión temperatura peloide P₅



De los valores experimentales obtenemos la ecuación de la curva que los representa. En la tabla siguiente exponemos los coeficientes de las ecuaciones de los diferentes peloides. En esta tabla t_0 corresponde al *tiempo de inercia* inicial, pequeña zona inicial en meseta en la que la temperatura se mantiene constante.

$T = T_0 + A \cdot e^{\frac{-(t-t_0)}{t_r}}$	t_0	T_0	A	t_r
P₁	1.90	37	8	9.90
P₂	0.80	37	8	4.60
P₃	1.80	37	8	10.60
P₄	1.30	37	8	6.50
P₅	1.60	37	8	4.99

Se completan estos datos en la tabla siguiente con t_{37} que es el tiempo que se necesita para que el peloide se enfríe a 37 °C calculado a partir de la ecuación anterior.

	t_0 minutos	t_r minutos	t_{37} minutos
P₁	1.90	9.9	43.4
P₂	0.80	4.6	20.2
P₃	1.80	10.6	46.4
P₄	1.30	6.5	28.5
P₅	1.60	4.9	21.9

Podemos calcular la cantidad de calor cedido por un kilogramo de peloide durante su proceso de enfriamiento, en función de las distintas temperaturas alcanzadas y de su capacidad calorífica suponiendo que se mantenga constante con la variación de temperatura.

Tendremos así: (Q_{tr}), calor cedido hasta alcanzar el tiempo de relajación, al que corresponde a una temperatura de 39,9 °C, $Q_{(t37)}$, que es el calor total, y $Q_{(t37)} - Q_{(tr)}$, el calor cedido en la parte final del proceso.

	$Q_{(tr)}$ (J)	$Q_{(t37)}$ (J)	$Q_{(t37)} - Q_{(tr)}$ (J)
P₁	17229	27256	10027
P₂	9618	15216	5598
P₃	14913	23592	8679
P₄	10280	16264	5984
P₅	11211	17736	6525

Teniendo en cuenta estos valores del calor cedido y los tiempos necesarios para alcanzar las diferentes temperaturas podremos obtener unas velocidades de cesión de calor, el flujo calorífico, en (cal/minuto), para cada tramo del proceso.

El flujo Φ_{t37} será la velocidad media del proceso total, el Φ_{tr} , la velocidad hasta alcanzar el tiempo de relajación, suma de t_0 y t_r , y el $\Phi_{(tr-t37)}$, la velocidad que existe en el tramo final una vez alcanzado el tiempo de relajación.

	$\phi_{tr} = \frac{Q_{tr}}{(t_r + t_0)}$ (cal/min)	$\phi_{37} = \frac{Q_{37}}{t_{37}}$ (cal/min)	$\phi_{(tr-t37)} = \frac{(Q_{t37} - Q_{tr})}{(t_{37} - t_r - t_0)}$ (cal/min)
P₁	348,2	152,0	75,9
P₂	425,6	179,1	90,3
P₃	286,6	121,8	60,2
P₄	315,3	136,1	68,8
P₅	411,3	193,5	101,7

COMENTARIOS

Utilizando sencillas pruebas de laboratorio se pueden conocer algunos parámetros térmicos de los peloides.

Las ecuaciones deducidas del estudio del comportamiento experimental de los peloides durante el proceso de cesión de calor corresponden al fenómeno físico general de enfriamiento de un cuerpo y sus parámetros sirven para caracterizarlos y comparar diferentes productos entre si.

Los peloides P_2 y P_5 son los que más rápidamente ceden calor, mayor valor del flujo térmico, aunque su cantidad de calor total sea de las menores, coincidiendo con ser también los que tienen una baja retentividad calórica.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Prat S., Brozek B. Biology and physics of peloids. En Medical hidrology. Baltimore : S. Lych Editor, 1963.
- 2 Sena L. Unidades de las magnitudes físicas y sus dimensiones. Moscú: MIR, 1979.
- 3 Bird R. Fenómenos de Transporte. Barcelona: Reverté, 1982.
- 4 Armijo F. Propiedades térmicas de los peloides. Bol. Soc. Esp. Hidrol. Med. 1991; VI: 3, 151-157.
- 5 Groot S. Termodinámica de los procesos irreversibles. Madrid: Alhambra, 1968.
- 6 Lewis J. Thermal properties of peloids. Archivos medical hidrology 13, 56, 1935.
- 7 Nashchokin V. Engineerin Thermodynamics and Heat transfer. Moscú: MIR, 1979.
- 8 Rambaud A., Rambaud J., Berger G., Pauvert B. Mesure et étude du comportement thermique des boues thermales. Journal Français d'Hydrologie, 1986, 17, Fasc 3, 293-302.