

## **CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE BENTONITAS PARA USO COMO RELLENO EN SONDEOS GEOTÉRMICOS**

**Autor 1<sup>[\*]</sup> (Ricardo Álvarez Currás), Autor 2<sup>[\*\*]</sup> (D. Miguel Ángel Rey Ronco; Dña. Teresa  
Alonso Sánchez)**  
[\*] Alumno; [\*\*] Tutor(es)  
[UO155885@uniovi.es](mailto:UO155885@uniovi.es)

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

### **RESUMEN**

La conductividad térmica es el principal parámetro a tener en cuenta durante el diseño de intercambiadores de calor en aplicaciones de energía geotérmica. En el presente trabajo, se medirá la conductividad térmica de un material de naturaleza arcillosa, la bentonita, tratando de analizar la hipotética idoneidad de la misma para ser usada como material de relleno en sondeos geotérmicos de baja temperatura. La técnica de medida empleada para la determinación de dicha propiedad termofísica, será la sonda de hilo caliente, una técnica de alta precisión que además se ha empleado exitosamente en todo tipo de materiales independientemente de la naturaleza y estado físico de los mismos. Las medidas se han efectuado a baja temperatura (en el intervalo entre 25 y 60°C), para simular las condiciones de temperatura reinantes a la profundidad habitual de los sondeos geotérmicos. Para llevar este proceso a cabo, se ha trabajado con la bentonita en diferentes estados, desde bentonita en polvo, a bentonita en bloque, tras ser sometida a un proceso de cocción y secado. Tras ello, se han identificado 3 variables como aquellas que más afectan al valor de la conductividad térmica: el índice de porosidad, la humedad, y la temperatura de medida.

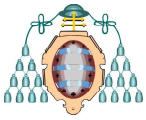
### **ABSTRACT**

Thermal conductivity is the main parameter that must be taken into account in the design of heat exchangers for geothermal energy needs. In this paper, thermal conductivity of a clay-based material (bentonite) is measured in order to

determine its suitability as borehole grouting material in low geothermal energy wells. The transient hot wire is the measurement technique for this purpose, due to its high accuracy and the wide sort of materials in which it was used, with excellent results in all cases. The interval of temperatures varies between 25 and 60°C in order to make sure that the typical working temperatures are reached. To carry out this process, several types of bentonite samples were prepared (from bentonite in dust to a block of bentonite, after drying). Three variables have been identified as the ones that affect the thermal conductivity values: porosity, moisture and temperature of measurement.

### **1 INTRODUCCIÓN**

De acuerdo con [1] los sistemas de bomba de calor geotérmica (GCHP) consisten en un circuito cerrado de tuberías enterradas en el subsuelo, estableciéndose una transmisión de calor bien desde el suelo o hacia el mismo. Dependiendo de las necesidades energéticas que precise la vivienda, puede ser necesario extraer calor de la misma, cediéndolo al terreno, o bien aportar calor a la misma, en cuyo caso, la dirección en que se transmite el calor se invierte. Dicha transmisión de calor será tanto más eficiente, cuanto mayor sea el valor de la conductividad térmica del material que se inyecta entre la pared del sondeo y el tubo, que suele estar fabricado a base de materiales poliméricos.



La bentonita es un filossilicato de aluminio muy similar a la montmorillonita. Existen diferentes tipos de bentonita, de acuerdo principalmente al elemento dominante, siendo las 2 principales variedades la bentonita sódica y la cálcica. Es un material con unas propiedades que le han conferido un amplio rango de utilidades a nivel industrial. Entre dichos usos, cabe destacar su aplicación como lodo de perforación tras ser mezclada con una determinada cantidad de agua, y de esta forma se consigue la estabilidad de las paredes del pozo, así como evitar la contaminación de acuíferos, al permanecer los mismos debidamente aislados. También ha desarrollado un importante papel como material de fabricación de moldes de fundición. Otras aplicaciones más recientes de la bentonita, se orientan hacia la industria alimentaria, farmacéutica y como material absorbente y adsorbente.

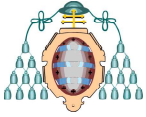
Se ha demostrado que es posible alcanzar alta conductividad en los materiales de relleno, mezclando bentonita con otros materiales de diversa naturaleza. En este sentido, [2] utilizan diversas mezclas de bentonita con grafito, utilizando este último material en las siguientes formas: como copos, grafito natural expandido (ENG) y grafito natural expandido y comprimido (CENGg). Se observa un notable incremento de la conductividad térmica incluso con muy bajos ratios de grafito. Se observa una gran influencia en los resultados del contenido en agua. [3] indican que las propiedades mecánicas de la bentonita están totalmente supeditadas al contenido de agua con el que se mezcle. Se plantean 3 posibles situaciones: un bajo ratio agua-bentonita indica que la mezcla se asemeja mucho más a un sólido que un líquido, con lo que su uso queda restringido a aglomerar materiales, debido a la alta capacidad de adherencia que adquiere la mezcla bajo esas circunstancias. Si se aumenta el contenido de agua, la mezcla alcanza una elevada plasticidad. Finalmente, en caso de una excesiva proporción de agua, las mezclas se denominan suspensiones y es en ese estado donde las bentonitas son mayormente empleadas a nivel industrial. Asimismo, el secado parcial de las mezclas bentonita-grafito conlleva una significativa reducción de la conductividad térmica. En este mismo sentido, [4] analizan el

comportamiento de mezclas bentonita-grafito y de bentonita-cuarcita utilizando múltiples proporciones de cuarcita y grafitos, y variando la temperatura del ensayo, hasta temperaturas de 150°C como máximo.

Dado que muchos de los materiales de relleno investigados son de alto coste, existen diferentes alternativas. La primera consiste en utilizar los rípios de perforación, es decir, usar el propio material que previamente formaba parte del subsuelo. El principal inconveniente que presenta el uso de este tipo de materiales es su baja conductividad térmica. La otra posible alternativa, es el empleo de materiales de desecho industrial. [5], utilizan cenizas volantes pulverizadas (PFAs) como base de material de relleno, mezclando con cemento y con distintas proporciones de otros materiales, entre los que se encuentran arena, vidrio esmerilado, fluorita y arena gruesa o fina. Los resultados obtenidos son muy dispares dependiendo de la mezcla, obteniendo pobres incrementos de conductividad en caso de mezclas con arena fina y vidrio esmerilado, mientras que se observan muy buenos rendimientos con arena gruesa y fluorita (con un 20% de PFA).

Los rellenos con base cemento son ampliamente utilizados, lo que ha suscitado un gran interés en encontrar mezclas del mismo, que sean capaces de mejorar la conductividad. Las mezclas de cemento superplástico con arena, de acuerdo con [6] mejoran tanto la conductividad térmica y al mismo tiempo reducen ostensiblemente la conductividad hidráulica, lo cual es muy deseable para prevenir la comunicación de acuíferos entre sí, eliminando de este modo toda posibilidad de que los mismo se puedan contaminar. Otra técnica de interés creciente son los cementos reforzados con fibras. [7] se sirvieron de varios tipos de fibras: acero, acero inoxidable, carbono, cristal y basalto. Las fibras que ofrecen un mejor comportamiento en cuanto a propiedades mecánicas son las de acero y de carbono (dimensiones de las mismas de 13mm).

Los métodos experimentales para la medida de la conductividad térmica se dividen en estáticos (o estacionarios) y dinámicos, según que la temperatura de cada punto del material, sea dependiente o no del tiempo. Uno de los



problemas más notables lo representa la medida del flujo de calor a través de la muestra. Existen 3 formas posibles para su determinación: midiendo eléctricamente el calor liberado por la fuente de calor, midiendo el flujo de calor en la parte fría de la muestra mediante un calorímetro (ambos forman parte de los métodos absolutos) o por comparación, esto es, colocando paralelamente a la muestra a analizar, una de conductividad conocida, de forma tal que se mide el gradiente térmico en esta última (métodos comparativos). Otra clasificación atiende a cómo se transmite el flujo de calor en la muestra. Se distingue entre métodos donde el flujo de calor es longitudinal, y flujo de calor radial, donde los gradientes de temperatura se miden en muestras que rodean por completo a la fuente de calor.

### 1.1 Métodos estacionarios

Se basan en que, durante la medida, la temperatura permanece constante en todos los puntos de la muestra. Los métodos estacionarios utilizan expresiones matemáticas sencillas, tienen una gran precisión, aunque son lentos y el rango de aplicabilidad es más restringido que los métodos dinámicos. Finalmente, requieren unas características de las muestras muy específicas, y los gradientes de temperatura que se necesitan son elevados [8], [9], [10], [11].

### 1.2 Métodos no estacionarios o dinámicos

Son rápidos, el tamaño de muestra que se necesita es reducido y no se necesitan elevados gradientes de temperatura. Pueden, a su vez, clasificarse en métodos periódicos y no periódicos. Los primeros, se basan en generar una variación senoidal de temperatura en la superficie de la muestra y medir la temperatura en un punto alejado de la misma. Entre los métodos no periódicos se encuentra el método del hilo caliente.

#### 1.2.1 Método del hilo caliente

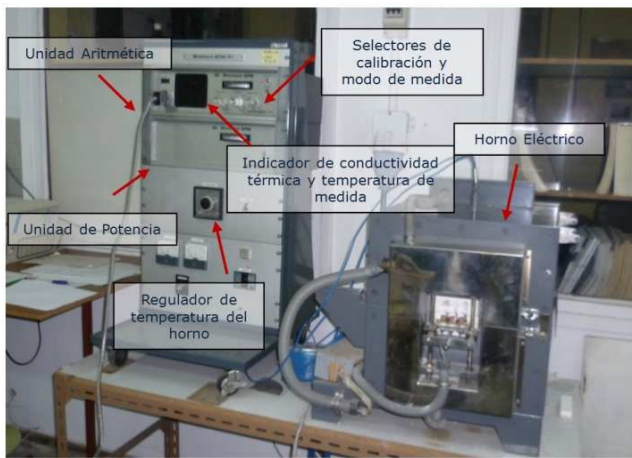
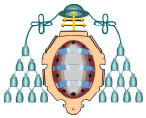
Existen 4 variantes del método del hilo caliente, todos ellos con un modelo teórico común, y donde la principal diferencia entre ellas, reside en el procedimiento de medida de la temperatura. Están basados en la Norma ASTM C1113. Se trata de una técnica aplicable a todo tipo de sustancias, sean estas líquidas o sólidas. Su primera

aplicación práctica en materiales sólidos se atribuye a [12], que midió la conductividad térmica de materiales refractarios a altas temperaturas. El método se basa en la medida del incremento de temperatura que produce una fuente de calor lineal que se encuentra en el seno del material del que se desea conocer la conductividad. El método presenta algunos inconvenientes, como ya apuntó [13], se necesita un contacto hilo-muestra muy bueno, ya que de lo contrario, los resultados obtenidos no son fiables. Por otro lado, se observan una gran número de ventajas, siendo una de las principales, el disponer de un sistema que permite determinar la conductividad a diferentes temperaturas, operando en un amplísimo abanico. Dado que un elevado número de procesos industriales transcurren a altas temperaturas, gran parte de las aplicaciones del método se han centrado en esta temática. Sin embargo, hay situaciones en que se requiere determinar la conductividad térmica a bajas temperaturas (por ejemplo en aplicaciones geotérmicas de baja temperatura). [14], miden conjuntamente la conductividad térmica y la difusividad térmica mediante el método del hilo caliente, para diversos materiales a baja temperatura.

## 2 MÉTODO TRABAJO

### 2.1 Descripción del equipo de medida

El dispositivo empleado para la medida de la conductividad será el equipo *Quick Thermal Conductivity Meter Shotherm QTM-F1* (fabricado por Showa). El equipo, se encuentra formado por tres grandes elementos: unidad aritmética, unidad de potencia, y por último la unidad térmica, conformada a su vez por un horno de mufla, y la correspondiente unidad de control de potencia del horno.

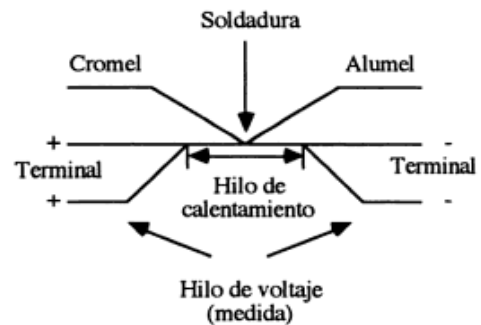


**Figura 1: Principales partes del equipo de medida Quick Thermal Conductivity Meter Shotherm QTM-F1**

La unidad aritmética devuelve en cada ensayo el valor de la conductividad junto con la temperatura a la que se ha realizado el ensayo. Ésta, se obtiene simplemente como la media aritmética de las temperaturas al inicio y al final del ensayo. En esta unidad cuenta asimismo con diversos selectores que permiten la calibración del equipo previo a cada medida, el ajuste a cero, seleccionar el modo de medida, de forma tal que se corrija por cambio de temperatura base de la muestra, y variar la distancia entre los hilos de voltaje. Finalmente, permite fijar el flujo de corriente que atraviesa el hilo de calentamiento.

La unidad fuente de potencia regula la intensidad de corriente que se suministra al hilo de calentamiento. La unidad de control de la potencia del horno permite regular la velocidad de calentamiento y la temperatura que debe alcanzar el horno para realizar una medida a una temperatura dada.

El elemento de medida, situado en el interior del horno, consta de los siguientes elementos: Hilo de calentamiento, fabricado en una aleación de Ni-Cr (sus dimensiones son 0,2mm de espesor, 1,2mm de anchura, y 600mm de longitud). Hilo de voltaje, del mismo material que el hilo de calentamiento, y separado 140mm. Por último, se dispone evidentemente de un termopar de cromel-alumen (cuyas dimensiones son 0,1mm de espesor, 0,5mm de anchura y 320mm de longitud).



**Figura 2: Detalle del elemento de medida del equipo Quick Thermal Conductivity Meter Sotherm F1 de la casa Showa (visto en planta).**

## 2.2 Descripción de la bentonita

La bentonita es la materia prima con la que se ha trabajado en el presente trabajo. Se trata de una bentonita de tipo sódico, activada. Sus principales características se recogen en la Tabla 1.

Características Bentonita	
Propiedad	Valor
Humedad (%)	6 a 18
pH	10,5±0,5
Granulometría inf. 75µm (%)	20
Hinchabilidad (ml/2g)	40-50
Propiedades Reológicas	
Viscosidad aparente (cps)	25
Viscosidad plástica (cps)	1 a 5

**Tabla 1: Principales propiedades de la bentonita ensayada.**

## 2.3 Realización del ensayo

Se han preparado dos muestras de material de idénticas dimensiones. Las dimensiones mínimas de las 2 probetas, se determinan por el orden de magnitud esperado para la conductividad térmica (ver tabla adjunta).

Conductividad Térmica (Kcal/m·h°C)	Dimensiones (mm)
0,1	6x12x150
0,5	15x30x150
1	20x40x150
2	26x60x150
3	32x65x150

**Tabla 2: Dimensiones de la muestra en función de la conductividad térmica esperada para el material de análisis.**

Se dispone de 2 moldes de material refractario cuyo fin es albergar la bentonita.

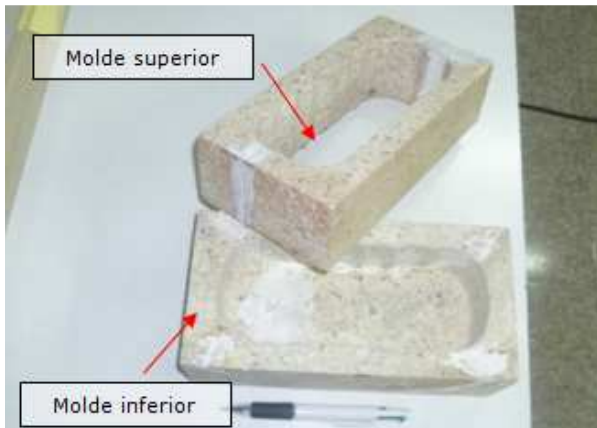
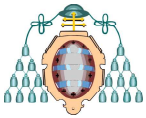


Figura 3: Detalle de los moldes superior e inferior para ensayos con material en polvo.

Uno de estos moldes (de forma rectangular y con un hueco central donde se deposita el material), se coloca dentro del horno eléctrico de mufla de que consta el equipo, bajo los hilos de calentamiento mostrados en la Figura 2. Posteriormente se ajusta la altura de los hilos, hasta que los mismos contacten con la bentonita depositada en el molde. A continuación, se coloca el segundo molde, justo encima del primero y de los hilos. Este molde, está hueco en su parte central, y de ese modo se vierte bentonita en él hasta su superficie. Con esta disposición de moldes, se logra un contacto hilo-bentonita adecuado. Es fundamental conseguir un buen nivel de compactación de la bentonita, con el fin de evitar un grado de porosidad excesivo.



Figura 4: Disposición interior del horno, con elementos de medida y muestra.

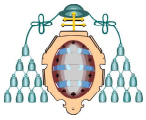
Seguidamente comienza el proceso de medida de la conductividad propiamente dicho. Se ha de seleccionar, el nivel de corriente que va a través el hilo de calentamiento. Al igual que con las dimensiones que ha de tener la muestra, dicho nivel de corriente está supeditado a la conductividad térmica esperada para el material de análisis (véase tabla adjunta).

Conductividad Térmica (Kcal/m·h°C)	Intensidad (A)
<0,1	0,25
0,1-0,2	0,5
0,2-0,4	1
0,4-0,8	2
0,8-1,5	4
>1,5	8

Tabla 3: Ajuste de la corriente eléctrica a través del hilo de calentamiento en función de la conductividad térmica esperada para el material de análisis.

Dado que, en un principio, se desconoce cómo tratar la bentonita para los ensayos, se opta por realizar parte de los mismos con el material en 2 estados distintos: bentonita compactada en seco denominada "muestra en polvo", y con bentonita mezclada con agua y secada denominada "en ladrillo". En el primer caso, se emplean los moldes de la Figura 3. Se realizan ensayos en un primer lugar, sin compactar el material (62% de porosidad), y tras observar los bajos valores obtenidos, se procede a una compactación manual del material (proceso por el cual, el valor de la porosidad disminuye hasta el 51%). Con el resto de ensayos, como se ha comentado, se procede fabricando 2 ladrillos idénticos de 200x70x20mm. Estos ladrillos se fabrican mezclando la bentonita con agua, de forma tal que se facilite el moldeo de la misma, para posteriormente realizar el secado de los ladrillos al aire libre. De esta manera, se evita la aparición de grietas de desecación, fenómeno que provocaría una "porosidad secundaria" y haciendo no fiables los resultados. Con el fin de chequear cómo influye la humedad en la medida de la conductividad térmica, se efectúan diversas medidas en el transcurso del secado de los bloques: a 57 y 40% de humedad, y finalmente una vez seca, es decir a la humedad ambiental.

La misma situación se plantea respecto de la intensidad de corriente que circula por el hilo de calentamiento. En principio se desconoce qué valor seleccionar, por lo que se decide ver la evolución que experimenta la bentonita a



diferentes temperaturas derivadas de la variación de la intensidad. En todos los ensayos se ha seguido un mismo procedimiento, pasando de menores a mayores intensidades (o lo que es lo mismo, de menores a mayores temperaturas), para así evitar que entre 2 medidas consecutivas, la bentonita no haya cedido todo el calor al ambiente. En total, se han llevado a cabo un total de 20 ensayos.

A continuación, se detallan cada uno de los ensayos realizados durante la investigación, cada uno de ellos con una nomenclatura dada:

Intensidad [A]	Bentonita polvo		Bentonita ladrillo	
	Porosidad %	Identif. ensayo	% humedad	Identif. ensayo
2A	62	PSCa	57	L1a
	51	PCa	40	L2a
			Seca	L3a
1A	62	PSCb	57	L1b
	51	PCb	40	L2b
			Seca	L3b
0,5A	62	PSCc	57	L1c
	51	PCc	40	L2c
			Seca	L3c
0,25A	62	PSCd	57	L1d
	51	PCd	40	L2d
			Seca	L3d

**Tabla 4: Nomenclatura y características de los ensayos realizados.**

### 2.3.1 Determinación de la porosidad de las muestras

Para la determinación de la porosidad es necesario conocer el volumen total de la muestra y el volumen de huecos. Se emplea la siguiente expresión:

$$Porosidad = \frac{V_{huecos}}{V_{total}} * 100 \quad (1)$$

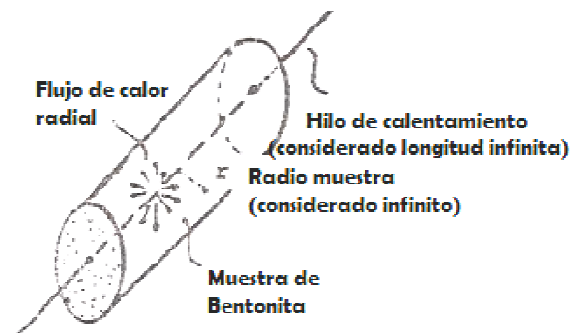
El procedimiento de obtención del volumen de huecos es sencillo. En un recipiente de volumen conocido, se deposita el peso bentonita correspondiente a ese volumen. Posteriormente, se añade agua hasta saturar la bentonita, teniendo el peso de agua más bentonita. Mediante resta, se sabe el peso de agua que ocupa los poros, y sabiendo que a su vez, la densidad del agua es 1g/cm<sup>3</sup>, se tiene finalmente el volumen de huecos. Se procede de este mismo modo para la bentonita sin compactar, y después de efectuar una compactación a mano. Como ya se ha apuntado, las porosidades obtenidas son del 62 y 51% respectivamente.

### 2.3.2 Determinación de la humedad de las muestras

La humedad se ha determinado, sencillamente, por sucesivas diferencias de pesada entre el ladrillo de bentonita recién moldeado, (saturado en agua) y el mismo ladrillo, transcurrido un intervalo de tiempo determinado.

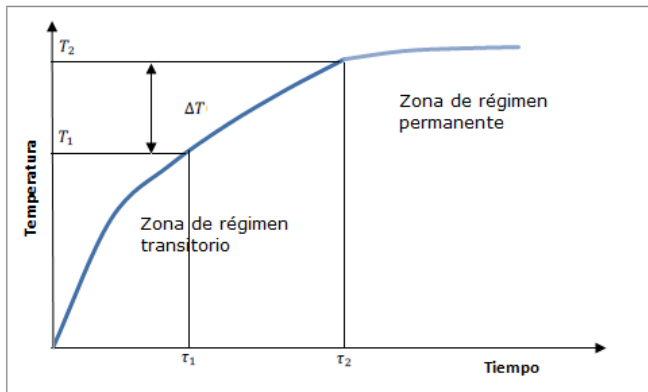
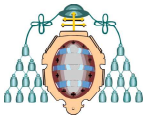
## 2.4 Principio de medida de la conductividad térmica

El principio de medida del método del hilo caliente lleva asociadas distintas hipótesis. Se asume que el hilo de calentamiento es una fuente de calor de dimensiones infinitas, que se encuentra totalmente embebida en el material del que se quiere determinar la conductividad. Por otro lado, se considera que el hilo de calentamiento tiene una conductividad térmica infinita.



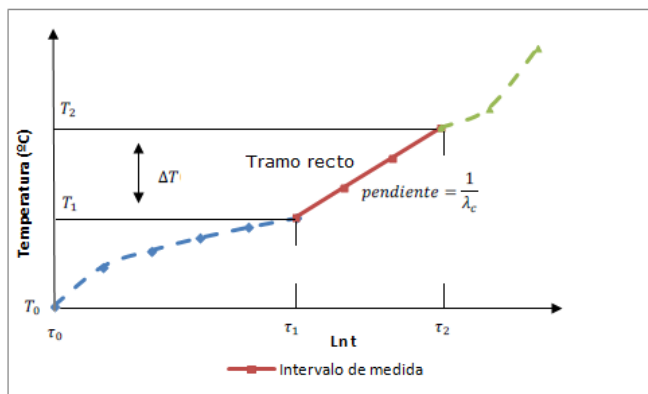
**Figura 5: Disposición muestra-hilo e hipótesis**

En el método del hilo caliente, al aplicar una corriente eléctrica constante a través del hilo de calentamiento, extendido en el centro de una muestra cilíndrica de longitud y radio considerados infinitos, el flujo de calor generado radialmente, así como la temperatura en las proximidades del hilo de calentamiento, crecen de forma exponencial con el transcurso del tiempo.



**Figura 6: Evolución de la temperatura con el tiempo**

Este fenómeno se aprecia en la Figura 6. El incremento de temperatura registrado en el punto de medida, aumenta exponencialmente, hasta el momento en que todos los puntos de la superficie exterior de la muestra, comienzan a intercambiar calor con el ambiente exterior, momento en el cual, la temperatura se estabiliza. Cambiando la base en la que se representa el tiempo, y pasando a usar una base logarítmica, la curva exponencial de la Figura 6 cambia, pasando a establecerse una relación lineal entre el tiempo de medida y la temperatura del ensayo (véase Figura 7).



**Figura 7: Evolución de temperatura frente al tiempo (en escala logarítmica).**

La pendiente de la mencionada recta, será la inversa de la conductividad térmica del material. El valor numérico de la conductividad, por tanto, viene dado por la expresión:

$$\lambda_c = \frac{q * \ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{4\pi * (T_2 - T_1)} \quad (2)$$

Donde:

$\lambda_c$  = Conductividad térmica del material, en W/mK.  
 $\tau_1$  y  $\tau_2$  son los tiempos inicial y final de medida respectivamente, en segundos.

$T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas correspondientes al tiempo inicial y final de medida respectivamente, en K.

El valor  $4\pi$  que figura en el denominador, hace referencia al flujo de calor radial que se establece, y que parte desde la parte central del hilo de calentamiento a través del material, hasta su superficie exterior.

$q$  = potencia calorífica por unidad de longitud, en W/m.

El flujo de calor de la expresión anterior, al producirse por el paso de la corriente eléctrica a través de un material conductor, se debe al Efecto Joule, cuya expresión se adjunta:

$$q = 0,86 * R * I^2 = 0,86 * \frac{V * I}{L} \quad (3)$$

Donde:

$R$  = resistencia eléctrica, medida en  $\Omega$ .

$I$  = intensidad de la corriente eléctrica que circula por el hilo de calentamiento, en A.

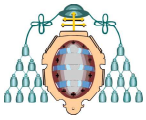
$V$  = voltaje, expresado en V.

$L$  = longitud del hilo de calentamiento por la que fluye la corriente, en m. En este caso, dicha longitud se ha fijado en 140mm.

Otro parámetro crucial, es saber cuál es el tiempo idóneo de medida. Éste, según [15], el tiempo de medida depende de diversos factores como la difusividad térmica de las muestras, la forma y dimensiones de la muestra, y las condiciones ambientales, es decir, la temperatura a la que se encuentra la muestra en el interior del horno. Sin embargo, el equipo de medida empleado, cuenta con sistemas que establecen de forma automática el tiempo.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras llevar a cabo diversas medidas, con diferencias en cuanto a preparación de muestras, y variando las condiciones de trabajo del equipo, se han encontrado 3 aspectos que son susceptibles de afectar a la medida de la

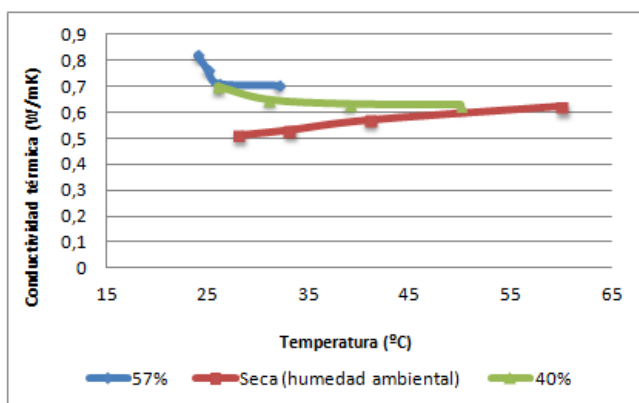


conductividad térmica de la bentonita. Son los siguientes: humedad de la bentonita, porosidad de la bentonita e intensidad de corriente que circula a través del hilo de calentamiento. En los epígrafes posteriores se analizan en detalle dichos aspectos.

### 3.1 Influencia de la humedad de la muestra

La humedad de la muestra se ha mostrado como un parámetro fundamental que afecta a la conductividad térmica de la bentonita. Se ha observado un marcado incremento de la conductividad, a medida que aumenta la humedad. Se alcanza un valor máximo de la conductividad de 0,82W/mK, frente a 0,62W/mK, valor máximo registrado para la bentonita con la humedad ambiental.

Sin embargo, se observan diferentes tendencias, en lo referente a la relación que dichos datos mantienen con la temperatura media del ensayo. En el caso de la bentonita con porcentajes de humedad del 57 y 40%, se produce un descenso de la misma, a medida que aumenta la temperatura de medida. Por el contrario, para bentonita seca, la tendencia se invierte, aunque en cualquier caso, el aumento de conductividad térmica que se produce, se puede considerar prácticamente despreciable (se pasa de 0,628W/mK a 50°C a tan solo 0,7W/mK a 26°C).

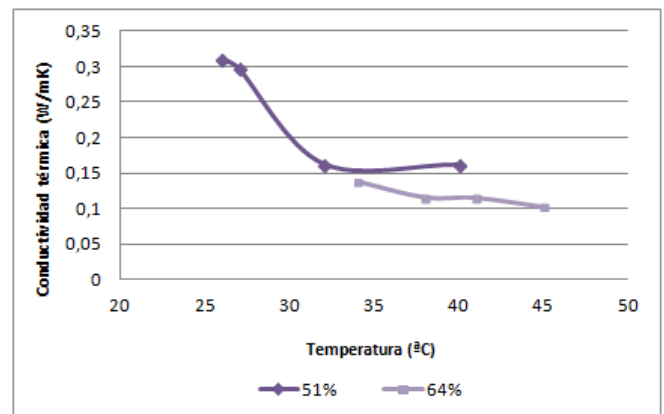


**Figura 8: Efecto sobre la conductividad térmica de la humedad de la bentonita.**

### 3.2 Influencia de la porosidad

El volumen de huecos de la muestra desarrolla un papel prioritario en la conductividad térmica, ya que determina la capacidad de la bentonita de

albergar aire, agua u otro fluido en su interior. Como es lógico, el tener un fluido u otro va a afectar a valor global de la conductividad. Para la bentonita en polvo, se observa a cualquier temperatura un claro aumento de la conductividad, con valor máximo de 0,3W/mK. Dicha tendencia, se puede apreciar en la gráfica adjunta.



**Figura 9: Efecto de la porosidad de la muestra sobre la conductividad de la bentonita.**

### 3.3 Influencia de la intensidad de corriente a través del hilo de calentamiento

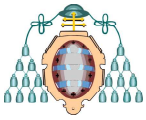
Hablar de intensidad que circula por el hilo de calentamiento, es hacerlo de la temperatura que alcanza dicho cable durante el ensayo. A este respecto, los resultados obtenidos muestran, en general, una disminución de los valores de conductividad térmica con respecto a la temperatura.

Esta tendencia, es mucho más marcada en algunos casos que en otros, especialmente en el caso de la bentonita en polvo compactada a mano. Todo lo contrario ocurre en el caso de la bentonita seca, donde incluso se produce un ligerísimo aumento de la conductividad temperatura.

## 4 CONCLUSIONES

Se ha investigado la conductividad térmica de la bentonita como material de relleno en sondeos geotérmicos de baja temperatura. Se han identificado una serie de parámetros que, en diverso grado, afectan al valor de la conductividad





térmica. Dichos parámetros son: la porosidad de la muestra, el contenido de humedad de la misma, y la temperatura. De acuerdo al análisis de los datos obtenidos, se han llegado a las siguientes conclusiones:

- Debido a la naturaleza arcillosa de la bentonita, la porosidad de la muestra, presenta en todo momento valores altos, incluso tras compactación. Este hecho hace, que el fluido que ocupa los poros, tenga una gran influencia en el valor de la conductividad térmica. Por ello, en aquellos casos en que se tienen valores relativamente altos (un 57%) de humedad, la conductividad medida es comparativamente más alta que la correspondiente a la bentonita seca. Todo ello se sustenta simplemente atendiendo a la conductividad térmica del aire y del agua a una misma temperatura (por ejemplo a 20°C, la conductividad del agua es 0,6W/mK frente a 0,026W/mK para el aire).
- El incremento de la compactación de la muestra, se traduce en un aumento ligero de la conductividad.
- El incremento de temperatura, hace que la conductividad del material disminuya. En las muestras de baja compactación y/o baja humedad, se alcanzan (para una misma intensidad de corriente circulando por el hilo de calentamiento) más altas temperaturas. Esto sucede porque la bentonita, debido al bajo nivel de conductividad que presenta en esas circunstancias, no evacua el calor que se genera en el hilo de calentamiento, quedando concentrado en la muestra, y consiguientemente elevándose la temperatura, esto es, se tarda mucho más tiempo en alcanzar el régimen permanente.
- Los valores de conductividad obtenidos para la bentonita, deben ser comparados con aquellos correspondientes al detritus de perforación del sondeo, para determinar si la bentonita actúa a modo de resistencia

térmica o si por el contrario, mejora la conductividad que poseen los materiales del subsuelo.

Adicionalmente, tras la realización del presente trabajo, quedan abiertas futuras líneas de investigación en el ámbito del uso de la bentonita como material de relleno en sondeos geotérmicos de baja temperatura. Una alternativa interesante es la medición de la conductividad térmica de mezclas de bentonita mejorada por la presencia de otros materiales, adquiriendo una especial atención aquellos otros materiales que estén disponibles en cantidades aceptables y a un bajo coste. Ejemplos de estos materiales son cenizas volantes de centrales térmicas o escorias (de horno alto o bien de cualquier otro proceso metalúrgico) o bien mineral de fluorita, que tiene una conductividad térmica muy elevada.

A priori, ambos parecen materiales prometedores, ya que contienen óxidos metálicos, los cuales son buenos conductores térmicos y eléctricos. Sería interesante asimismo, valorar su potencial en diferentes condiciones de humedad y a distintas temperaturas.

## 5 NOMENCLATURA

Equivalencia: 1Kcal/hm°C=1,1622W/mK

Parámetros de expresiones (expresados en unidades del Sistema Internacional):

$\lambda_c$ = Conductividad térmica del material, W/mK.

q= Potencia calorífica por unidad de longitud, W/m.

R= Resistencia eléctrica,  $\Omega$ .

I= Intensidad de la corriente eléctrica que circula por el hilo de calentamiento, A.

V= Tensión eléctrica, V.

L= Longitud del hilo de calentamiento, m.

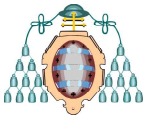
$\tau$ = Tiempo de medida, s.

T= Temperatura correspondiente a un tiempo de medida, K.

Acrónimos y abreviaturas:

CENGg= Compressed Expanded Natural Graphite (grafito natural expandido y comprimido).

ENG= Expanded Natural Graphite (grafito natural expandido).



GCHP= Ground-Coupled Heat Pump (bomba de calor geotérmica).

Norma ASTM C1113= Método estandarizado para la medida de la conductividad térmica por el método del hilo caliente.

PFA= Powder Flying Ash (cenizas volantes pulverizadas).

TRT= Thermal Response Test (test de respuesta térmica).

### AGRADECIMIENTOS

El autor del presente Trabajo Fin de Máster, desea agradecer a la empresa SEPIOLSA su colaboración, por la cesión de la bentonita que ha servido de material de investigación. Al Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Oviedo, por dejar a nuestra disposición el laboratorio de Metalurgia de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo (ETSIMO). A título personal, a Dña. M<sup>a</sup> José Rodríguez Cuervo, maestra de laboratorio del laboratorio de Metalurgia de la ETSIMO, y a D. Germán Marcos Robredo, ingeniero del grupo de investigación Q-Thermie, por su ayuda desinteresada y total disposición.

### 6 REFERENCIAS

[1] R. Borinaga-Treviño, P. Pascual-Muñoz, D. Castro-Fresno, and E. Blanco-Fernandez, "Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 53, no. 1, pp. 13–20, Abril 2013.

[2] F. Delaleux, X. Py, R. Olives, and A. Dominguez, "Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 33–34, pp. 92–99, Feb. 2012.

[3] A. G. Clem and R. W. Doehler, "Industrial Applications of bentonite." .

[4] M. Jobmann and G. Buntebarth, "Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste," *Appl. Clay Sci.*, vol. 44, no. 3–4, pp. 206–210, May 2009.

[5] A. A. Altimi, M. Rouainia, and D. A. C. Manning, "Thermal enhancement of PFA-based

grout for geothermal heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*

[6] M. L. Allan, "Materials characterization of superplasticized cement-sand grout," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 6, pp. 937–942, Jun. 2000.

[7] M. L. Berndt and A. J. Philippacopoulos, "Incorporation of fibres in geothermal well cements," *Geothermics*, vol. 31, no. 6, pp. 643–656, Diciembre 2002.

[8] M. A. Llavoma, J. P. Sancho, L. F. Verdeja, R. Zapico, and F. Alvarez, "Density, hardness and thermal conductivity of Hall-Heroult crusts.," *Light Met.*, pp. 429–437, 1990.

[9] M. A. Llavoma, "Determinación de la conductividad térmica de materiales (II): Método del hilo caliente y de la lámina caliente.," *Inf. Tecnológica*, vol. 6, no. 2, 1995.

[10] M. A. Llavoma, L. F. Verdeja, J. P. Sancho, and F. Blanco, "Humedad, pérdida al fuego y conductividad térmica de las alúminas industriales Bayer," *Rev. Minas*, vol. 7, pp. 37–43, 1992.

[11] M. A. Llavoma, R. Zapico, L. F. Verdeja, and J. P. Sancho, "Some contributions to the study of the thermal conductivity of industrial Bayer aluminas," *Light Met.*, pp. 201–206, 1988.

[12] Haupin, "Hot wire method for rapid determination of thermal conductivity," *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 39, no. 3, pp. 139–141, 1960.

[13] W. R. Davis, "Hot wire method for the measurement of thermal conductivity of refractory materials," *Compendium of thermophysical property measurement methods*. Plenumpress, London, pp. 231–254, 1984.

[14] R. Warnke and G. Woelk, "Das heizdrahtverfahren zur messung der warme und temperaturleitfähigkeit von elektrisch leitenden und nichtleitenden stoffen.," *Arch Eisenhüttenwes*, vol. 11, pp. 785–789, 1974.

[15] W. N. Dos Santos and R. Gregório, "Numerical and experimental determination of the minimum and maximum measuring times for the hot wire parallel technique," *Cerámica*, vol. 49, 2003.