

---

# **ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA TRANSMISIVIDAD TÉRMICA EN ARENISCAS DE CANTABRIA**

---



---

## **RESEARCH STUDY ON THERMAL TRANSMISSIVITY IN SANDSTONES OF CANTABRIA**

---

Para acceder al Título de  
**GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS**

**MINEROS**

Autor: Carla Bolado Pontigo

Director: Gema Fernández Maroto

Codirector: Pablo Bernardo Castro Alonso

Coordinador: Raúl Husillos Rodríguez

Septiembre 2016



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia su apoyo. Especialmente a mi madre por darme la libertad de elegir mi futuro en todo momento. A Jana y Jaime quiero darles las gracias su apoyo, su cariño y su confianza en mí durante estos años.

En segundo lugar, agradecer a Gema Fernández Maroto por acceder a ser mi tutor del proyecto, por la ayuda en el laboratorio y en las distintas tutorías, y por la disposición en todo momento para facilitarme la realización de este estudio. También agradecer al codirector Pablo Bernardo por su tiempo y dedicación en la realización de este trabajo y a Primo Vejo por su ayuda y experiencia que han sido esenciales. Sin vuestra ayuda no hubiera sido posible realizar esta investigación.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer, a todo el personal de la escuela por la disposición y la atención que me han aportado a lo largo de estos años. A mi amiga Ángela Pardo, por su apoyo en todo momento. A mi amigo Razvan Pascal por su ayuda siempre que lo he necesitado. También a los demás compañeros y amigos de la Escuela, con los que tan buenos momentos he vivido.

## CONTENIDO

|       |                                                               |    |
|-------|---------------------------------------------------------------|----|
| 1     | ESTADO DEL ARTE .....                                         | 13 |
| 1.1   | INTRODUCCIÓN .....                                            | 13 |
| 1.2   | DEFINICIÓN DE CALOR Y TEMPERATURA.....                        | 13 |
| 1.3   | TERMODINAMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR .....                  | 14 |
| 1.4   | FORMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....                         | 14 |
| 1.4.1 | Conductividad térmica .....                                   | 15 |
| 1.4.2 | Conductividad térmica en las rocas.....                       | 20 |
| 1.4.3 | Capacidad térmica .....                                       | 21 |
| 1.5   | METODO PLACA CALIENTE GUARDADA .....                          | 21 |
| 1.6   | IMPORTANCIA DE LA GEOTERMIA EN ROCAS .....                    | 23 |
| 1.6.1 | Transmisión de calor en el manto.....                         | 28 |
| 1.6.2 | Estudio geológico en la mitad occidental de España.....       | 29 |
| 1.7   | ROCAS ORNAMENTALES .....                                      | 34 |
| 1.7.1 | Propiedades físicas de las rocas ornamentales .....           | 36 |
| 1.7.2 | Ensayos para la caracterización de rocas ornamentales .....   | 38 |
| 2     | OBJETO.....                                                   | 42 |
| 3     | MATERIAL INVESTIGADO: ARENISCAS EN CANTABRIA .....            | 44 |
| 3.1   | INTRODUCCIÓN .....                                            | 44 |
| 3.2   | LA ARENISCA.....                                              | 46 |
| 3.3   | FORMACIÓN DE LAS ARENISCAS .....                              | 50 |
| 3.4   | PETROGRAFIA DE LAS ARENISCAS .....                            | 51 |
| 3.5   | ARENISCAS EN CANTABRIA .....                                  | 57 |
| 3.5.1 | Introducción .....                                            | 57 |
| 3.5.2 | Estratigrafía .....                                           | 57 |
| 3.5.3 | Características petrográficas de las muestras estudiadas..... | 60 |
| 4     | METODOLOGIA .....                                             | 63 |
| 4.1   | INTRODUCCIÓN .....                                            | 63 |
| 4.2   | DESARROLLO DEL ENSAYO.....                                    | 63 |
| 4.2.1 | Descripción del material utilizado.....                       | 63 |

*“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”*

---

|       |                                                   |     |
|-------|---------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2 | Procedimiento.....                                | 67  |
| 4.2.3 | Datos recogidos en el laboratorio .....           | 71  |
| 5     | <b>RESULTADOS</b> .....                           | 76  |
| 5.1   | INTRODUCCION .....                                | 76  |
| 5.2   | DATOS OBTENIDOS .....                             | 77  |
| 5.3   | CALCULO DE LA CONDUTIVIDAD .....                  | 84  |
| 5.4   | COMPARACIÓN DE DATOS OBTENIDOS .....              | 93  |
| 6     | <b>DISCUSIÓN</b> .....                            | 96  |
| 7     | <b>CONCLUSIÓN</b> .....                           | 101 |
| 7.1   | CONCLUSIONES COMO RESULTADO DE ESTE ESTUDIO ..... | 101 |
| 8     | <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                         | 103 |

## **LISTADO DE FIGURAS**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Modelo que representa el flujo de calor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 14 |
| Figura 2 Formas de transferencia de calor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 15 |
| Figura 3 Volumen diferencial de un medio continuo de dimensiones $dx$ , $dy$ , $dz$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 18 |
| Figura 4 Ubicación de las fuentes y del material a ensayar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 22 |
| Figura 5 Tabla que muestra las dimensiones para la construcción del Aparato de Placas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 23 |
| Figura 6 Tabla de producción de calor para diversos tipos de roca con diferentes contenidos en $U$ , $Th$ y $K$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 24 |
| Figura 7 Relación entre la producción de calor y la velocidad de propagación de las ondas $P$ en las rocas. B. Relación entre la producción de calor y la densidad de las rocas (Según Rybach y Bunterbath 1982)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 25 |
| Figura 8 Dispositivo para medir la conductividad térmica de una roca en el laboratorio (según Turcotte y Schubert 1982)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 26 |
| Figura 9 Variación de la temperatura con la profundidad en continentes océanos para diferentes valores del flujo de calor (en $mWm^{-2}$ ). $TF$ es la temperatura del comienzo de la fusión del manto. La profundidad de la intersección de las curvas con la recta $T=0.085 TF$ puede ser utilizada como definición del espesor de la litosfera (según Pollack y Chapman 1977)                                                                                                                                                                              | 27 |
| Figura 10 Variación del flujo de calor medio de las rocas en función de su edad para corteza continental y oceánica (Sclater 1972 y Morgan 1985).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 28 |
| Figura 11 Gráfica en la que se muestra el campo dentro del cual varían las temperaturas en función de la profundidad (según Ranalli 1987)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 29 |
| Figura 12 Los triángulos y círculos representan valores de flujo de calor medidos en sondeos de agua mineros, y en sondeos de petróleo respectivamente. Los cuadrados representan valores de flujo de calor en sondeos de agua sin corregir, y los triángulos blancos sondeos de agua medidos pero no usados en la determinación de flujo de calor. Las estrellas indican valores de producción radiogénica de calor, ZSP: Zona Surportuguesa, ZOM: Zona Ossa- Morena, ZCI: Zona Centroibérica, ZAOL: Zona Asturoccidental Leonesa, ZC: Zona Cantábrica.      | 31 |
| Figura 13a) Geotermas calculadas bajo condiciones de decaimiento exponencial y producción radiogénica iguales en las dos áreas, Zona Centroibérica (línea continua) y Zona Surportuguesa (línea discontinua) del Macizo Ibérico. b) Geotermas calculadas considerando valores estimados de producción radiogénica de calor y con la restricción de grosor litosférico de 110 km (corte con la isoterma de 1350 °C). $Q_{sup}$ = flujo de calor superficial, $A_0$ = producción radiogénica de calor, $b$ = constante de decaimiento, BDS = basalt dry solidus | 34 |
| Figura 14 Tabla de los grupos de Rocas Ornamentales y su utilización principal (Bustillo et al., 2001)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 35 |
| Figura 15 Tabla de la densidad y porosidad de rocas utilizadas en construcción (Esbert et al, 1997)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 37 |
| Figura 16 Tabla de ensayos de caracterización de las Rocas Ornamentales y normas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 38 |
| Figura 17 Tabla de las características petrográficas de los materiales rocosos (Esbert et al. 1997).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| Figura 18 Tabla de clasificación textural de las rocas. (Esbert et al, 1997).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 39 |
| Figura 19 El comportamiento tecnológico de una Roca Ornamental va a depender de su composición mineralógica y de su textura. a) Textura cristalina variedad masiva. b) Textura cristalina variedad foliada. (Castro Dorado, 1989).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 39 |
| Figura 20 Gráfico de la estratigrafía de Cantabria                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 45 |
| Figura 21 Gráfico de la estratigrafía del paleozoico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 45 |
| Figura 22 Gráfico de la estratigrafía del cretácico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 46 |
| Figura 23 Gráfico de la estratigrafía del triásico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 46 |

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 Clasificaciones de las areniscas en diagramas triangulares Q (cuarzo)-F (feldespato)-FR (fragmentos de roca). A, según Pettijohn (1957). B, según Folk (1968) (Bastida, 2005)                                                                             | 48 |
| Figura 26 Clasificación de las areniscas según Pettijohn y otros (1987) (Bastida, 2005)                                                                                                                                                                             | 48 |
| Figura 27 Micrografía con nicoles cruzados (Bastida, 2005)                                                                                                                                                                                                          | 49 |
| Figura 28 Formación de las rocas sedimentarias (Bastida, 2005)                                                                                                                                                                                                      | 51 |
| Figura 29 Clasificación de las rocas sedimentarias según las proporciones de Te (Terrígenos), Al (aloquímicos) y O (ortoquímicos) (Dorado, 1989)                                                                                                                    | 52 |
| Figura 30 Clases de granulometría y correspondientes nombres de rocas detríticas (Bastida, 2005)                                                                                                                                                                    | 53 |
| Figura 31 Patrones para determinar el sorting en rocas detríticas (principalmente rocas de tamaño de grano arena). (Basado en Pettijohn et al. 1973) (Dorado, 1989)                                                                                                 | 53 |
| Figura 32 Patrones para determinar el grado de redondez de los clastos.                                                                                                                                                                                             | 54 |
| Figura 33 Diagrama de flujo para determinar la madurez textura en areniscas. Basado en Folk (1951). Valores de sorting y redondez según lo establecido en apartados anteriores (Dorado, 1989)                                                                       | 55 |
| Figura 34 Esquema representando los distintos grados de empaquetamiento y nomenclatura utilizada para cada uno (Dorado, 1989)                                                                                                                                       | 56 |
| Figura 35 Secuencia de los minerales más comunes en las rocas cristalinas, ordenados según el grado de alteración química (Según Blatt, 1982) (Dorado, 1989)                                                                                                        | 56 |
| Figura 36. Muestra de arenisca CA-3E                                                                                                                                                                                                                                | 60 |
| Figura 37 Muestra de arenisca CA-2D                                                                                                                                                                                                                                 | 60 |
| Figura 38 Muestra de arenisca CA-1F                                                                                                                                                                                                                                 | 61 |
| Figura 39 Muestra de areniscas B-1F                                                                                                                                                                                                                                 | 61 |
| Figura 40 Muestra de arenisca SP-2E                                                                                                                                                                                                                                 | 61 |
| Figura 41 Muestra de arenisca SP-1E                                                                                                                                                                                                                                 | 61 |
| Figura 42 Balanza con precisión $\pm 0.01$ gramos                                                                                                                                                                                                                   | 64 |
| Figura 44 Tabla de características de la estufa de laboratorio                                                                                                                                                                                                      | 64 |
| Figura 43 Estufa de laboratorio-1450W                                                                                                                                                                                                                               | 64 |
| Figura 45 Tabla de características generales del alimentador de laboratorio MANSON EP-613                                                                                                                                                                           | 65 |
| Figura 46 Alimentador de laboratorio MANSON EP-613                                                                                                                                                                                                                  | 65 |
| Figura 47 Tabla de características generales del calibre analógico pulsador Inzize 1223                                                                                                                                                                             | 65 |
| Figura 48 Calibre analógico pulsador Inzize 1223                                                                                                                                                                                                                    | 66 |
| Figura 49 Hilo conductor Nicrom 0.4mm                                                                                                                                                                                                                               | 66 |
| Figura 50 Cable de seguridad-banana-cocodrilo                                                                                                                                                                                                                       | 66 |
| Figura 51 Tabla de características generales de la sonda superficial TP tipo K                                                                                                                                                                                      | 67 |
| Figura 52 Sonda superficial TP tipo K                                                                                                                                                                                                                               | 67 |
| Figura 53 Tabla de pesos de las muestras antes y después de ser introducidas en la estufa                                                                                                                                                                           | 68 |
| Figura 54 Tabla de medidas de las muestras de arenisca                                                                                                                                                                                                              | 68 |
| Figura 55. Esquema del alimentador de laboratorio. Siendo W, el interruptor de alimentación; Z, los bores de salida; P, Potenciómetros de la regulación basto y fino de la tensión y limitación de orriente; L, pantalla LCD de la corriente y tensión <sup>7</sup> | 69 |

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 56 Forma aplicada al hilo conductor                                             | 69 |
| Figura 57 Hilo conductor rodeado de aislante.                                          | 70 |
| Figura 58 Alimentador de corriente con las condiciones aplicadas al ensayo             | 70 |
| Figura 59 Muestra de arenisca CA-1F, encima del hilo conductor, realizándose el ensayo | 71 |
| Figura 60 Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-2D                                 | 71 |
| Figura 61 Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-3E                                 | 72 |
| Figura 62 Tabla de datos obtenidos de la muestra SP-2E                                 | 72 |
| Figura 63 Tabla de datos obtenidos de la muestra B-1E                                  | 73 |
| Figura 64 Tabla de datos obtenidos de la muestra SP-1F                                 | 73 |
| Figura 65 Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-1E                                 | 74 |
| Figura 66 Muestra de arenisca CA-2D                                                    | 77 |
| Figura 67 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra CA-2D                      | 77 |
| Figura 68 Tabla de medidas y pesos de la muestra CA-2D                                 | 78 |
| Figura 69 Tabla de datos de porosidad y densidad de la muestra CA-2D                   | 78 |
| Figura 70 Muestra de arenisca CA-3E                                                    | 78 |
| Figura 71 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra CA-3E                      | 79 |
| Figura 72 Tabla de Medidas y pesos de la muestra CA-3E                                 | 79 |
| Figura 73 Tabla de datos de densidad y de porosidad de la muestra CA-3E                | 79 |
| Figura 74 Muestra de arenisca SP-2E                                                    | 79 |
| Figura 75 Tabla de datos obtenidos en el ensayo de a muestra SP-2E                     | 80 |
| Figura 76 Tabla de medidas y pesos de la muestra SP-2E                                 | 80 |
| Figura 77 Tabla de densidad y porosidad de la muestra SP-2E                            | 80 |
| Figura 78 Muestra de arenisca B-1E                                                     | 80 |
| Figura 79 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra B-1E                       | 81 |
| Figura 80 Tabla de medidas y pesos de la muestra B-1E                                  | 81 |
| Figura 81 Tabla de densidad y porosidad de la muestra B-1E                             | 81 |
| Figura 82 Muestra de arenisca SP-1F                                                    | 81 |
| Figura 83 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra SP-1F                      | 82 |
| Figura 84 Tabla de pesos y medidas de la muestra SP-1F                                 | 82 |
| Figura 85 Tabla de datos de densidad y porosidad de la muestra SP-1F                   | 82 |
| Figura 85 Muestra CA-1E                                                                | 83 |
| Figura 87 Tabla de datos obtenidos dela muestra CA-1E                                  | 83 |
| Figura 88 Tabla de pesos y medidas de la muestra CA-1E                                 | 83 |
| Figura 89 Tabla de densidad y porosidad de la muestra CA-1E                            | 83 |
| Figura 90 Tabla de resultado de (T1-T2) de la muestra CA-2D                            | 84 |
| Figura 91 Tabla de conductividades de la muestra CA-2D                                 | 85 |



***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Figura 92 Tabla de resultado de $(T_1-T_2)$ de la muestra CA-3E         | 86        |
| <b>Figura 93 Tabla de conductividades de la muestra CA-3E</b>           | <b>86</b> |
| Figura 94 Tabla de resultados obtenidos $(T_1-T_2)$ de la muestra SP-2E | 87        |
| <b>Figura 95 Tabla de conductividades de la muestra SP-2E</b>           | <b>88</b> |
| Figura 96 Tabla de resultados $T_1-T_2$ de la muestra B-1E              | 89        |
| Figura 97 Tabla de las conductividades de la muestra B-1E               | 89        |
| Figura 98 Tabla de resultados de $T_1-T_2$ de la muestra SP-1F          | 90        |
| Figura 99 Tabla de conductividad de la muestra SP-1F                    | 91        |
| Figura 100 Tabla de los resultados $T_1-T_2$ de la muestra CA-1E        | 92        |
| Figura 101 Tabla de las conductividades de a muestra CA-1E              | 93        |
| Figura 102 Tabla resumen de las diferentes muestras de arenisca         | 94        |
| Figura 103 Muestra de arenisca B-1E                                     | 96        |
| Figura 104 Muestra de arenisca CA-1E                                    | 97        |
| Figura 105 Muestra de arenisca SP-2E                                    | 97        |
| Figura 106 Muestra de arenisca CA-2D                                    | 98        |
| Figura 107 Muestra de arenisca SP-1F                                    | 98        |
| Figura 108 Muestra de arenisca CA-3E                                    | 99        |
| Figura 109 Comparativa de las muestras de arenisca                      | 99        |

# RESUMEN

## RESUMEN

Este trabajo de Fin de Grado (TFG) se basa principalmente en el estudio de la conductividad térmica de diferentes areniscas. La conductividad térmica es un factor fundamental para realizar estudios de calefacción y acondicionamiento térmico en edificios, como parámetro que indica la cantidad de calor que se pierde o se gana en un ambiente, habitación, etc.

En este estudio se pretende valorar las diferentes capacidades de conducción térmica de muestras de areniscas de Cantabria con características petrográficas variables. Para ello se explican una serie de términos previos, como son el calor, la temperatura y las formas de transferencia de calor. La geotermia también es muy importante, debido a que así se pueden observar los diferentes comportamientos que tiene el flujo de calor dependiendo de la geología de Cantabria y aplicarlo a las muestras con las que se va a realizar el ensayo.

Para esto, se ha llevado a cabo un ensayo en el laboratorio de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. El ensayo se ha basado en el Método de la Placa Caliente, que consiste en aplicar calor a las muestras, a lo largo de determinados períodos de tiempo, para obtener valores de conductividad. Durante el ensayo se tomaron imágenes del método, datos de temperatura, calor, peso, medidas, porosidad y densidad de cada una de las muestras. Posteriormente se realizó un análisis de la conductividad frente la porosidad y densidad de las distintas muestras por separado y después se realizaron comparativas generales de las muestras.

# CAPÍTULO 1:

# ESTADO DEL ARTE

# 1 ESTADO DEL ARTE

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En todo estudio de investigación es necesario analizar toda la información, documentación o bibliografía existente hasta el momento relacionada con el tema de investigación. Para ello se ha realizado la búsqueda de una serie de términos previos para realizar el estudio, tanto en libros de la biblioteca, como en artículos de reciente publicación y proyectos obtenidos del Repositorio UCrea y a través del Google Académico.

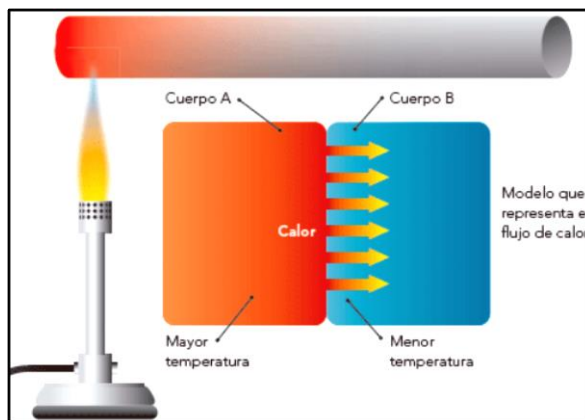
En este estudio se pretende valorar las diferentes capacidades de conducción térmica de muestras de areniscas de Cantabria con características petrográficas variables. Para ello se explican una serie de términos previos, como son el calor, la temperatura y las formas de transferencia de calor. La geotermia también es muy importante a la hora de realizar este estudio, debido a que así se puede observar los flujos de calor dependiendo de la geología de Cantabria y aplicarlo a las muestras con las que se va a realizar el ensayo.

Las areniscas son rocas ornamentales, por lo que se describe la importancia de las rocas ornamentales en la construcción, además de las propiedades físicas principales y los ensayos que se les pueden aplicar.

Para medir la conductividad térmica en este estudio se ha aplicado el Método de la Placa Caliente, con los recursos que se disponían en el laboratorio de Energías Renovables de la Escuela Politécnica de Minas y Energía.

## 1.2 DEFINICIÓN DE CALOR Y TEMPERATURA

Se denomina calor, o transferencia de calor, a la energía térmica que se transmite debido a la existencia de una diferencia de temperatura en un medio o entre medios. Concretamente, la energía se transmite desde zonas de alta temperatura a zonas de baja temperatura hasta el momento en que se alcanza el equilibrio térmico. En cuanto a las formas de transferencia de calor, existen tres mecanismos básicos: conducción, convección y radiación (Figura 1).



**Figura 1** Modelo que representa el flujo de calor

La temperatura es una magnitud de un sistema termodinámico y se refiere a la energía interna de las partículas de un sistema y su movimiento. Se mide en Kelvin (K) o en grados Celsius (°C).

Este parámetro ayuda a definir el estado en que se encuentra un cuerpo. Mientras la energía es una medida absoluta, la temperatura es relativa. El calor indica cómo se encuentra un cuerpo en relación a otro y la temperatura es la consecuencia de la energía que posee el cuerpo.

### 1.3 TERMODINAMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR

Un estudio termodinámico indica cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico, con el fin de cumplir el principio de conservación de la energía. La termodinámica trata de los estados en equilibrio y de los cambios que ocurren entre un estado de equilibrio y otro. Por otra parte, la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que se presenta desequilibrio térmico y, por tanto, existe una condición de no equilibrio.

En consecuencia, el estudio de la transferencia de calor no puede basarse sólo en los principios de la termodinámica, sino que se debe tener en cuenta además la base científica de la transferencia de calor.

La primera ley de la termodinámica establece que la velocidad de transferencia de energía hacia un sistema es igual a la velocidad de incremento de la energía de dicho sistema.

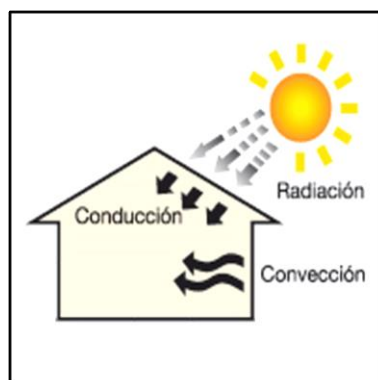
La segunda ley, establece que el calor se transfiere en dirección de la temperatura decreciente. El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura. No existe la más mínima posibilidad de que se dé transferencia neta de calor entre dos medios que están a la misma temperatura, esta diferencia de temperaturas constituye la condición básica necesaria para que se dé transferencia de calor. Por lo tanto a mayor gradiente de temperatura, mayor es la velocidad de transferencia de calor.

### 1.4 FORMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las velocidades de intercambio térmico y estas son propias de los equipos de intercambio de calor en procesos industriales. Puesto

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

que la transferencia de calor consiste en un intercambio en un sistema, la pérdida de calor de un cuerpo deberá ser igual al calor absorbido por otro dentro de los límites del mismo sistema.



**Figura 2 Formas de transferencia de calor**

Como se puede ver en la Figura 2, existen tres mecanismos fundamentales: conducción, convección, radiación.

En la transmisión de calor por conducción la energía se transmite entre dos puntos de un medio conductor que poseen distinta temperatura. Este proceso es de una gran importancia en sólidos, teniendo una menor relevancia en líquidos y gases, en los cuales aparece normalmente combinado con el fenómeno de convección. Además, comparado con éste, el mecanismo de conducción no conlleva un movimiento macroscópico de materia, cosa que sí ocurre en el caso de la convección.

En la transmisión de calor por convección coexisten dos mecanismos: la transferencia de energía debido al movimiento aleatorio de moléculas (proceso de difusión) y la debida al movimiento global o macroscópico del fluido (Incropera y DeWitt, 2005). La transferencia de calor por convección puede dividirse a su vez en dos mecanismos de acuerdo a la naturaleza del flujo. Así, la convección forzada se da cuando existe una fuente externa que causa el flujo (ventilador, bomba, etc.) y natural cuando este se debe a una diferencia de densidades asociada a una diferencia de temperaturas en el fluido. Pueden darse también situaciones en las que conviven ambos mecanismos.

En la transmisión de calor por radiación la energía térmica es emitida por la materia a través del vacío o de un medio material por el hecho de estar a una temperatura superior a los cero Kelvin. La emisión de energía por radiación puede darse en sólidos, líquidos y gases. El mecanismo de emisión de energía por radiación tiene que ver con los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constituyentes. La propagación de esta energía tiene lugar en forma de ondas electromagnéticas o alternativamente fotones (Incropera and De Witt, 2005).

En la práctica, estos mecanismos básicos actuarán de forma simultánea y/o combinada para permitir cuantos procesos de intercambio de energía existen en la naturaleza.

### **1.4.1 Conductividad térmica**

La conductividad térmica es una propiedad del material que mide la capacidad para conducir el calor.

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

A nivel atómico y molecular el mecanismo de conducción en el caso de los fluidos tiene lugar gracias a la interacción entre moléculas que favorece el traspaso de energía desde las más energéticas a las menos energéticas. Así, la alta temperatura de un fluido va asociada a una alta energía de sus moléculas que hace que al colisionar con las adyacentes den lugar a esa transferencia de energía. Además de la interacción entre moléculas, el propio movimiento aleatorio de estas, siendo unas más energéticas que otras, va a provocar la transferencia de energía neta en la dirección decreciente de la temperatura. En el caso más concreto de los sólidos, la transferencia de energía se atribuye a las vibraciones de la red cristalina y/o al movimiento de electrones libres como en el caso de los metales.

#### **1.4.1.1 Ley de Fourier**

Para cuantificar cada proceso de transferencia de calor por conducción y calcular la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo mediante este mecanismo se utiliza la ecuación conocida como Ley de Fourier (

Ecuación 1). Esta ley plantea que el flujo de calor entre dos puntos es proporcional al gradiente de temperatura existente entre ellos. Para el caso unidimensional, la ley tiene la forma siguiente

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dX} \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo  $q_x$  (W/m<sup>2</sup>) el flujo de calor en la dirección  $x$  por unidad de área,  $dT/dX$  el gradiente de temperatura y  $k$  la conductividad térmica del material. El signo negativo es consecuencia del Segundo Principio de la termodinámica y significa que el flujo de calor va en el sentido de las temperaturas decrecientes.

La conductividad térmica es una propiedad del material que mide la capacidad para conducir el calor. Este parámetro varía con la temperatura del material, pero en muchas situaciones prácticas, sobre todo en rangos pequeños de temperatura, puede considerarse un valor medio constante, no suponiendo esto una pérdida significativa de precisión en los cálculos térmicos a realizar. Su valor se determina de forma experimental.

Siendo la anterior una fórmula referida a un flujo de energía por unidad de área, la expresión de la tasa de calor por conducción  $q_x$  (W) para el caso uni-dimensional será la siguiente (Ecuación 2):

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dX} \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo  $A$  el área de la sección transversal perpendicular al flujo de calor.

Extendiendo la expresión (Ecuación 3) a las 3 dimensiones, la Ley de Fourier queda como sigue a continuación:

$$q = -KVT = -k \cdot \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$



***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Siendo  $T(x,y,z)$  el campo escalar de temperaturas.

La generalización de la expresión lleva a su vez a la conclusión de que la dirección del flujo de calor será siempre perpendicular a las superficies isotermas.

Finalmente, esta expresión puede descomponerse en sus componentes, llegándose de esta forma a las expresiones que se muestran a continuación. (Ecuación 4)

$$\mathbf{q} = -K\nabla T = -k \cdot (iq_x + jq_y + kq_z) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde (Ecuación 5, Ecuación 6, Ecuación 7)

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dX} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$q_y = -k \cdot \frac{dT}{dY} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$q_z = -k \cdot \frac{dT}{dZ} \quad \text{Ecuación 7}$$

#### **1.4.1.2 Resistencia de contacto**

Cuando dos superficies sólidas a distinta temperatura entran en contacto, surge entre ellas una resistencia térmica en la interfase que se denomina resistencia de contacto ( $R_c$ ). Este fenómeno se produce porque, aunque a nivel macroscópico las superficies de ambos sólidos puedan estar mecánicamente bien acabadas, éstas siguen siendo rugosas, o dicho de otra manera, no totalmente planas, y por lo tanto no ajustan perfectamente. Esto hace que entre los sólidos quede superpuesta una fina capa de fluido que ocupa los huecos existentes en la unión rugosa y que altera la transmisión de calor por vibración de la red cristalina.

El valor de la resistencia de contacto dependerá de la presión que existe entre los sólidos, su rugosidad y de las características del fluido que ocupa la interfase. La forma de transmisión de calor será combinación simultánea de los tres mecanismos básicos ya mencionados: por conducción entre los puntos de contacto de los sólidos, por convección entre el fluido y los sólidos, y por radiación entre las superficies de los sólidos (Fernández, 1999).

#### **1.4.1.3 Ecuación fundamental de transmisión de calor**

La ecuación fundamental de la transmisión de calor por conducción calcula la distribución espacial y temporal de temperaturas en un medio. Así, la resolución de la ecuación permite determinar la temperatura de cualquier punto del medio para cualquier instante de tiempo.

Una vez conocida la distribución de temperaturas ya será posible la evaluación del flujo de calor a través del material mediante la Ley de Fourier. Además, otros estudios como el de la

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

integridad estructural del material serán posibles para evaluar su posible stress térmico y/o sus expansiones o compresiones asociadas.

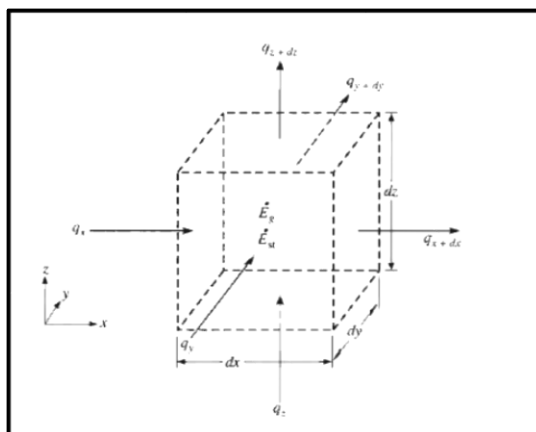
Para la determinación de esta ecuación se asumirá un intervalo de tiempo diferencial  $dt$  y un volumen de control diferencial (Figura 3) de un medio continuo de dimensiones  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$ .

Se asumirá además homogeneidad e isotropía, lo que hará que sus propiedades sean iguales en todos los puntos del medio continuo e independientes de la dirección en que se midan. El resultado de esta ecuación diferencial, para unas condiciones de contorno determinadas, proporcionará la distribución de temperaturas en el medio en función del tiempo.

Así, la expresión del balance de energía tomaría esta forma (Ecuación 8):

$$E_{int} - E_{out} + E_g = E_{st} \quad \text{Ecuación 8}$$

Siendo  $E_{in}$  y  $E_{out}$  las energías entrantes y salientes por conducción, respectivamente;  $E_g$ , la energía generada o disipada en el interior del volumen y  $E_{st}$  la energía almacenada en dicho volumen.



**Figura 3 Volumen diferencial de un medio continuo de dimensiones  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$**

Las energías entrantes y salientes del elemento por conducción toman los valores siguientes (Ecuación 9, Ecuación 10, Ecuación 11):

$$E_{in_x} = q_x \quad E_{out_x} = q_x + dx = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad \text{Ecuación 9}$$

$$E_{in_y} = q_y \quad E_{out_y} = q_y + dy = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad \text{Ecuación 10}$$

$$E_{in_z} = q_z \quad E_{out_z} = q_z + dz = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad \text{Ecuación 11}$$

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

Por su parte, la energía generada o disipada en el interior del volumen de control viene dada por la expresión (Ecuación 12):

$$E_g = q \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

**Ecuación 12**

Donde  $q$  ( $W/m^3$ ) es la tasa de calor generada o disipada en el medio por unidad de volumen.

Finalmente, la energía almacenada en el interior del volumen de control será (Ecuación 13):

$$E_{st} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

**Ecuación 13**

Donde  $\rho$  es la densidad y  $C_p$  el calor específico del medio, ambas propiedades invariables con el tiempo.

Sustituyendo los términos del balance energético por sus correspondientes ecuaciones se obtiene la ecuación diferencial de la transmisión de calor (Ecuación 14):

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + q \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

**Ecuación 14**

Teniendo en cuenta que según la Ley de Fourier (Ecuación 15):

$$q_x = -k \cdot dy \cdot dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \cdot dx \cdot dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \cdot dx \cdot dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

**Ecuación 15**

Sustituyendo las ecuaciones y dividiendo la expresión resultante por  $dx \cdot dy \cdot dz$  se obtiene la forma más general de la ecuación fundamental de la transmisión de calor por conducción en régimen transitorio con generación de energía (Ecuación 16):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

**Ecuación 16**

Con el objetivo de simplificar la expresión anterior, y asumiendo una conductividad térmica constante, la nueva expresión quedaría como se muestra a continuación. En esta nueva ecuación aparece el parámetro  $\alpha = k/\rho C_p$  para representar la difusividad térmica del medio (Ecuación 17).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

**Ecuación 17**

Si además se asume que no hay generación o disipación de energía en el medio analizado, la expresión quedaría finalmente de la siguiente forma (Ecuación 18):

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ecuación 18}$$

Finalmente, cualquiera de estas ecuaciones expresadas en coordenadas cartesianas podrían expresarse también en coordenadas cilíndricas o esféricas en caso de que la transmisión de calor por conducción en un cilindro o una esfera, respectivamente, quisieran ser analizadas.

Para la resolución de esta ecuación es necesario aplicar una serie de condiciones: una condición inicial relativa a la distribución temporal inicial de las temperaturas y dos condiciones de contorno relativas a su distribución espacial. En lo que se refiere a estas últimas, tres son los tipos de condiciones de contorno más habituales: de primera, de segunda y de tercera especie.

*La Condición de primera especie o Condición de Dirichlet*, se corresponde con el caso en que la superficie es mantenida a una temperatura constante (Ecuación 19):

$$T(x, y, z, t) = T_{sup} \quad \text{Ecuación 19}$$

*La Condición de segunda especie o Condición de Von Neumann*, se corresponde con el caso en que el flujo de calor a través de la superficie es constante (Ecuación 20):

$$q(x, y, z, t) = q_{sup} \quad \text{Ecuación 20}$$

Un caso especial de esta condición de contorno sería la adiabaticidad de una superficie, a través de la cual no existiría intercambio alguno de energía térmica.

*La Condición de tercera especie* se corresponde con el caso en que existe cierto intercambio de calor por convección entre la superficie del cuerpo y sus alrededores, siendo este intercambio proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie ( $T_s$ ) y el medio que la rodea ( $T_\infty$ ) (Ecuación 21):

$$q(x, y, z, t) = h \cdot [T_\infty - T(x, y, z, t)] \quad \text{Ecuación 21}$$

## 1.4.2 Conductividad térmica en las rocas

Este parámetro varía con la temperatura del material, pero en muchas situaciones prácticas, sobre todo en rangos pequeños de temperatura, puede considerarse un valor medio constante, no suponiendo esto una pérdida significativa de precisión en los cálculos térmicos a realizar. Su valor se determina de forma experimental.

Los valores de la conductividad térmica están ampliamente tabulados pero dichos datos han de considerarse con las reservas lógicas dado que se han obtenido por métodos experimentales y existe una amplia dispersión de características físicas entre materiales semejantes. Incluso para idéntico material se pueden medir diferentes conductividades en función de su humedad, de la temperatura de ensayo y de la dirección del flujo de calor (materiales anisótropos como la madera), por lo que los valores propuestos se suelen referir a materiales secos a 20°C.

La densidad aparente es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad de familias de materiales muy semejantes, como los hormigones, áridos y aislantes. Existe una ley

general que relaciona bajas conductividades para bajas densidades, porque la ligereza del material suele estar producida por huecos en su interior ocupados por aire, que es mucho más aislante que el material compacto. Esta propiedad nos permitirá extrapolar los valores de la conductividad a partir de los valores correspondientes a densidades determinadas.

### 1.4.3 Capacidad térmica

La capacidad térmica  $C_t$  [ $\text{J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{K}$ ] de los materiales constructivos de un cerramiento tiene una gran influencia en los procesos de transmisión de calor en régimen transitorio, determinando el fenómeno de la *Inercia Térmica* definida por el retardo y amortiguación de la onda de calor, y favoreciendo la estabilidad térmica del ambiente interior de los edificios.

El calor específico  $g$  [ $\text{J/kg } ^\circ\text{K}$ ] es uno de los dos factores que determinan la capacidad térmica de un material y su magnitud suele oscilar muy poco entre la mayoría de los materiales constructivos, con valores de 800 a 1.200 [ $\text{J/kg } ^\circ\text{K}$ ] en los materiales pétreos y entre 900 y 1.500 [ $\text{J/kg } ^\circ\text{K}$ ] en los materiales orgánicos, destacando como excepcionalmente alto el calor específico del agua con un valor de 4.184 [ $\text{J/kg } ^\circ\text{K}$ ]. Ello implica que el calor específico de un material puede aumentar bastante si contiene una elevada proporción de agua en su masa, como ocurre con el terreno natural o los cerramientos húmedos.

La densidad  $D$  [ $\text{kg/m}^3$ ] de los materiales constructivos puede tener valores muy dispares, desde 3.000 [ $\text{kg/m}^3$ ] las rocas compactas hasta solo 25 [ $\text{kg/m}^3$ ] los materiales aislantes, y es el factor determinante de la capacidad térmica de los materiales de los cerramientos. Los valores de las densidades de los materiales constructivos habituales están perfectamente tabulados, no ocurriendo lo mismo con los valores del calor específico que son muy poco frecuentes, mostrándose una selección de ellos en los anexos y en el próximo apartado.

La capacidad térmica total de un cerramiento [ $\text{J/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ ] es proporcional a su espesor, y dado que los materiales densos, además de tener una gran capacidad térmica, suelen ser buenos conductores térmicos y deben instalarse en grandes espesores para proporcionar el suficiente aislamiento térmico, se suele dar la coincidencia que la construcción pesada (piedra, hormigón...) tenga poco aislamiento y mucha inercia térmica, mientras que la construcción ligera (madera, aislantes...) tenga las propiedades opuestas.

## 1.5 METODO PLACA CALIENTE GUARDADA

Distintas normas indican que el coeficiente de conductividad térmica puede ser obtenido mediante la utilización de un aparato denominado de placa caliente, que consiste esencialmente en una fuente caliente constituida por una placa calefactora que comprende una parte central y un anillo de guarda separados por un espacio no mayor de 3 mm. Esta fuente está ubicada en el centro del equipo.

La fuente caliente se alimenta por medio de 4 conductores eléctricos (2 en la zona central y 2 en el anillo de guarda). Estos conductores se conectan a 2 variadores de tensión que permiten una alimentación progresiva de la corriente eléctrica que calienta paulatinamente la placa caliente.

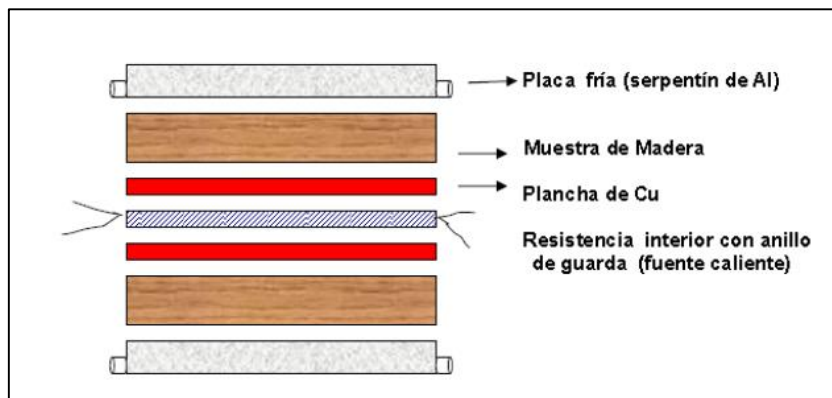
De este circuito eléctrico se miden permanentemente la tensión y la corriente. A ambos lados de la placa caliente se colocan 2 placas de material conductor (preferentemente cobre, pudiendo utilizarse aluminio u otros) con el objeto de formar una superficie homogénea de transmisión del calor.

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

Superpuestas a las placas conductoras se ubican las probetas del material a experimentar, y a continuación las planchas metálicas correspondientes a la fuente fría. Estas fuentes están compuestas por serpentines que permiten la circulación del agua de la red a efectos de mantener constante la temperatura. Todo lo indicado se observa la Figura 4.

En ambas caras de la probeta a ensayar deben colocarse termocupas en número suficiente para registrar permanentemente las temperaturas de la superficie fría y caliente. El conjunto se rodea de un material aislante para impedir fugas de calor al exterior. Se forma así una especie de “sándwich” horizontal formado por varias capas, donde el calor causado por la resistencia eléctrica en el centro se transmite hacia ambos lados externos por conducción.

Una de las normas internacionales que rigen la construcción y el funcionamiento de los equipos de placa caliente para la determinación de la conductividad térmica de los materiales es la Astm (American Standards for Testing Materials), ASTM C177-85: Standard Test Method for Steady State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot Plate Apparatus.



**Figura 4 Ubicación de las fuentes y del material a ensayar**

Entre las especificaciones más importantes para materiales homogéneos de espesor inferior a 10 cm se pueden nombrar:

- El método se aplica a materiales cuya conductividad no exceda de 0,62 kcal/m·h°C
- Las temperaturas del ensayo estarán comprendidas entre 45 °C y 760 °C
- El aislamiento exterior que rodea al anillo de guarda debe tener una resistencia de, por lo menos, el doble de la resistencia térmica de la placa del material que se ensaya.
- Los termopares serán de alambre cuyo diámetro no exceda de 0,57 mm
- El potenciómetro tendrá una sensibilidad mínima de 5 milésimas de milivoltio.
- La diferencia de temperaturas entre la cara caliente y la cara fría debe ser como mínimo de 22 °C

La atmósfera que rodea al ensayo debe tener como mínimo un punto de rocío superior a la temperatura más baja del aparato (para ambiente de la sala de laboratorio de 20 °C y 50% de humedad relativa, el punto de rocío es de 9 °C aproximadamente).

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

Otra de las normas que rigen el estudio de la conductividad térmica de los materiales es la Norma IRAM 11.559: Acondicionamiento térmico de edificios. Método de determinación de la conductividad térmica de materiales de construcción mediante el aparato de placa caliente,

El aparato construido y ensayado en el Departamento de Termodinámica se basó principalmente en esta norma. Ésta establece muy claramente todos los parámetros, dimensiones, materiales, etc. que deberán utilizarse para construir el aparato, y una vez construido establece concretamente los pasos a seguir para que el ensayo pueda obtener valores correctos y comparables.

Las dimensiones de las probetas están normalizadas, y en base a ellas se obtienen las magnitudes principales del equipo. Esto se observa en la siguiente tabla (Figura 5):

| Espesor máximo de la probeta (cm) | Medidas mínimas de la superficie de la fuente de calor (cuadrada o circular) en cm |                                                            | Distancia máxima entre resistencias (parte central y anillo de guarda (mm)) |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|                                   | Parte central de la fuente de calor                                                | Ancho del anillo de guarda alrededor de la fuente de calor |                                                                             |
| 2,5                               | 10                                                                                 | 5                                                          | 10                                                                          |
| 5                                 | 15                                                                                 | 7,5                                                        | 15                                                                          |
| 6,25                              | 30                                                                                 | 7,5                                                        | 20                                                                          |
| 10                                | 30                                                                                 | 15                                                         | 20                                                                          |

**Figura 5 Tabla que muestra las dimensiones para la construcción del Aparato de Placas**

La determinación de la conductividad térmica de los materiales es un factor fundamental para realizar estudios de calefacción y acondicionamiento térmico en edificios, ya que ésta propiedad indica la cantidad de calor que se pierde o se gana en un ambiente, habitación, etc.

Según la ley que rige la transferencia de calor en los sólidos (*Ley de Fourier de la conducción*, Ecuación 22), una vez que se ha alcanzado el régimen permanente, la velocidad de transmisión calorífica a través de un muro es:

$$q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde q es la velocidad de transmisión del calor a lo largo del espesor, en calorías/seg;  $\lambda$  es el coeficiente de conductividad térmica del material, en W/(mK); A es la sección del material, perpendicular al flujo del calor, en m<sup>2</sup>; dt es la variación de temperatura entre las caras fría y caliente, en °C; dx es el espesor en la dirección x, en metros.

## 1.6 IMPORTANCIA DE LA GEOTERMIA EN ROCAS

La Tierra se calienta gracias a la existencia de diversas fuentes de calor. Algunas de éstas son de origen exterior, así, la mayor parte del calor que llegar a la superficie de la Tierra procede del Sol. Sin embargo, el vulcanismo, las fuentes termales, etc... indican que en el interior también existen importantes fuentes de calor y que son responsables en gran medida de la distribución de la Temperatura interior de la Tierra. La energía térmica es responsable de una gran parte de los procesos geológicos y su estudio es indispensable para comprender la dinámica de la Tierra.



**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

La principal fuente externa de energía térmica es el Sol. El calor solar está producido por la fusión nuclear del hidrógeno para producir helio. Como consecuencia, se origina una transformación en energía de unas 40 Tm/s, que conduce al desarrollo de una potencia de  $3,6 \times 10^{26} \text{ W}$ , de la cual  $1,72 \times 10^{17} \text{ W}$  es interceptada por la tierra. La mayor parte de esta energía es empleada en el calentamiento de la atmósfera, la hidrosfera y la superficie de la Tierra, siendo responsable de gran parte de los procesos geológicos externos. No obstante, las rocas son malos conductores del calor, por lo cual, el calor solar penetra poco en el interior de la Tierra. En consecuencia, la intervención de la energía solar en el calentamiento del interior de la Tierra es despreciable en comparación con las otras fuentes internas de calor.

Actualmente se piensa que la mayor parte de la energía calorífica que se produce en el interior de la Tierra es debida a la desintegración radiactiva de elementos de vida larga, tales como  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ . Dado que los isótopos radiactivos se transforman en isótopos estables, la producción de calor debida a desintegración radiactiva decrece con el tiempo. La mayor parte de estos isótopos radiactivos se concentran en la corteza; sin embargo, dado el gran volumen que tiene el manto, éste también contribuye de una manera importante a la producción de calor terrestre mediante desintegración de elementos radiactivos. El núcleo terrestre también debe de contribuir en este sentido.

La determinación de la concentración de elementos radiactivos (U, Th y K) en muestras de roca constituye una base importante para medir la producción de calor por unidad de volumen de roca.

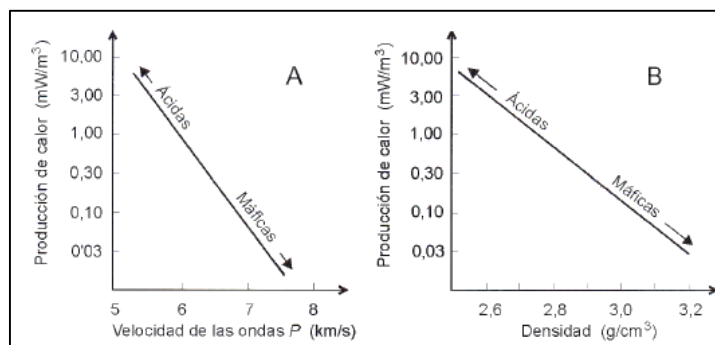
La tabla de la Figura 6 la producción de calor para diversos tipos de roca con diferentes contenidos en U, Th y K. A partir de esta tabla se deduce que la proporción de los citados elementos radiactivos y, por consiguiente, la producción de calor aumenta con el contenido en cuarzo, lo que significa una mayor producción de calor en la parte alta de la litosfera.

|                                 | U<br>ppm | Th<br>ppm | K<br>% | Producción de<br>calor $\mu\text{Wm}^{-3}$ |
|---------------------------------|----------|-----------|--------|--------------------------------------------|
| <b>Rocas corticales</b>         |          |           |        |                                            |
| <b>Rocas ígneas ácidas</b>      | 4.0      | 16.0      | 3.3    | 2.5                                        |
| <b>Rocas ígneas máficas</b>     | 0.5      | 1.5       | 0.5    | 0.3                                        |
| <b>Pizarras</b>                 | 4.0      | 12.0      | 2.7    | 2.1                                        |
| <b>Carbonatos</b>               | 2.2      | 1.7       | 0.3    | 0.7                                        |
| <b>Arenas de playa</b>          | 3.0      | 6.0       | 0.3    | 1.2                                        |
| <b>Posibles rocas del manto</b> |          |           |        |                                            |
| <b>Dunita</b>                   | 0.005    | 0.02      | 0.001  | 0.004                                      |
| <b>Eclogita</b>                 | 0.04     | 0.15      | 0.1    | 0.04                                       |
| <b>Lerzolitica oceánica</b>     | 0.02     | 0.06      | 0.005  | 0.01                                       |

**Figura 6** Tabla de producción de calor para diversos tipos de roca con diferentes contenidos en U, Th y K.

Otra parte del flujo de calor terrestre (entre el 15 y el 20%) se atribuye al enfriamiento de la Tierra a partir de su estado original caliente. Finalmente, hay que citar también otras fuentes de calor debidas a la conversión de energía mecánica en calor, como son: el calor generado por la relajación de la energía gravitacional al formarse el núcleo terrestre, el calor generado en la fricción de las placas y el calor generado en los procesos tectónicos. Rybach y Bunterbarth (1982) han establecido relaciones empíricas entre la producción de calor y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas primarias A y entre la producción de calor y la densidad de las rocas B (Figura 7).





**Figura 7** Relación entre la producción de calor y la velocidad de propagación de las ondas P en las rocas. B. Relación entre la producción de calor y la densidad de las rocas (Según Rybach y Bunterbath 1982)

### 1.1.1 Transmisión de calor en la litosfera

A partir de medidas en sondeos y minas, se sabe que la temperatura en la litosfera aumenta con la profundidad. Para medir este aumento, se utiliza el concepto de gradiente geotérmico, definido por (Ecuación 23):

$$\text{grad}T = \frac{dT}{dz}$$

**Ecuación 23**

Donde T es la temperatura y z la profundidad.

En la litosfera, el calor se transmite por conducción, y el flujo de calor q, definido como el calor transmitido por unidad de área en la unidad de tiempo (su unidad es el Wm<sup>-2</sup>), viene dado por la Ley de Fourier, que se expresa por (Ecuación 24),

$$q = -k \cdot \text{grad}T$$

**Ecuación 24**

Donde k es el coeficiente de conductividad térmica, que nos da una medida de la facilidad con que se transmite el calor a través de una roca. El signo menos indica que el calor fluye en la dirección en que disminuye la temperatura. La medida del flujo de calor requiere realizar dos medidas por separado: el gradiente geotérmico y el coeficiente de difusividad térmica de las rocas en las que se mide la temperatura.

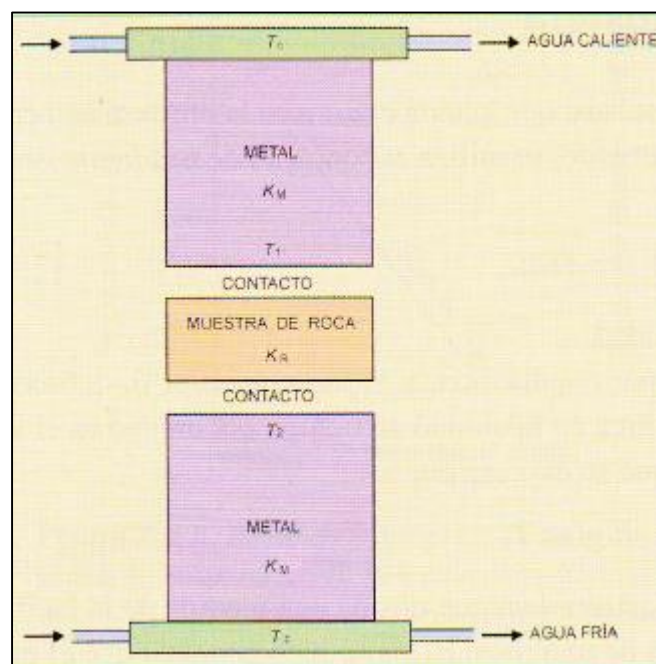
El gradiente geotérmico se mide en sondeos y minas mediante un termómetro electrónico denominado termistor, cuya sensibilidad es del orden del 0.01°C; con este aparato se realizan medidas a cortos intervalos de profundidad. Realmente, todos los sondeos están llenos de agua a partir de una cierta profundidad, por lo que las medidas se efectúan en el agua, lo cual requiere, para que sean correctas que ésta esté en equilibrio térmico con la roca.

Para medir la conductividad térmica de las rocas, es preciso recoger muestras en los sondeos y realizar la medida en el laboratorio. Se coloca la muestra entre dos masas de metal de conductividad térmica conocida K<sub>M</sub>. Se hace circular agua caliente sobre una de las masas de metal y agua fría por debajo de la otra masa y se miden las temperaturas en el extremo de la masa de metal caliente (T<sub>c</sub>) y en el extremo de la masa fría (T<sub>f</sub>); también se miden las temperaturas T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> del metal adyacente la muestra de roca. El contacto entre la roca y el metal tiene una

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

conductividad  $K_c$  desconocida. Con los datos anteriores, la Ley de Fourier permite conocer la conductividad térmica de la roca  $K_R$  (Figura 8).

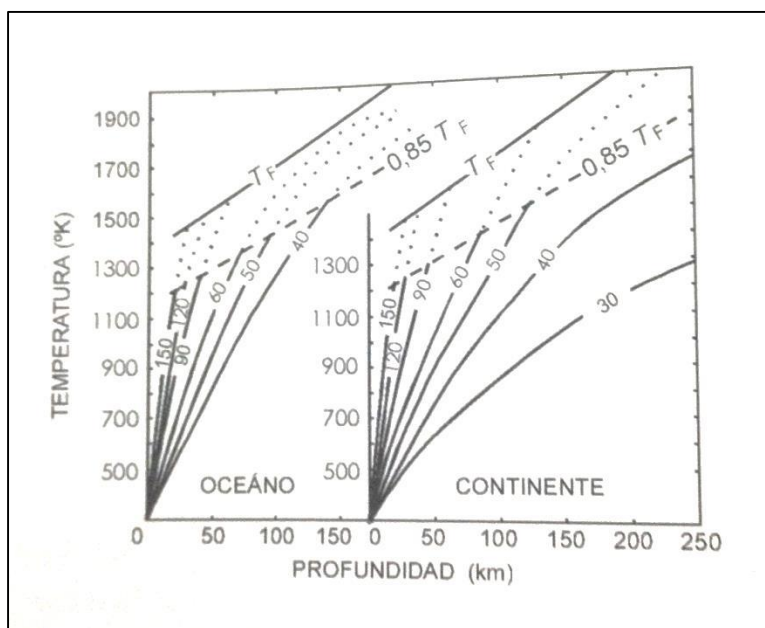
El flujo de calor en los sedimentos blandos del fondo oceánico puede medirse mediante una larga sonda cilíndrica terminada en punta con varios termómetros instalados a diversas alturas. Esta se introduce en los sedimentos hasta una profundidad de unos 20 m y se mide el gradiente de temperatura dentro de uno de ellos. Luego se calienta la sonda mediante un calentador eléctrico colocado en su base, y una vez se llega a una situación estable, se mide de nuevo el gradiente de temperatura lo cual permite medir la conductividad térmica. Las medidas de flujo de calor en áreas oceánicas son más fáciles de realizar y más fiables que las medidas de zonas continentales.



**Figura 8** Dispositivo para medir la conductividad térmica de una roca en el laboratorio (según Turcotte y Schubert 1982)

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

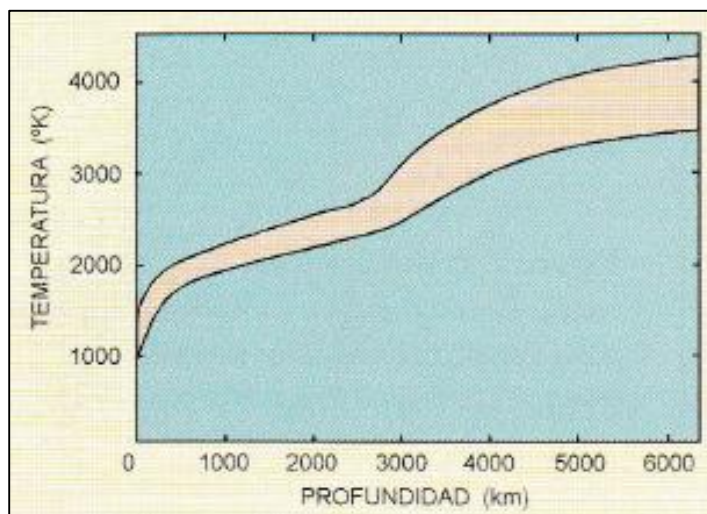
Los valores típicos del gradiente geotérmico oscilan entre 20 y 30°Ckm<sup>-1</sup>. Sin embargo, las medidas de gradiente realizadas mediante los métodos anteriormente descritos solo sirven para los primeros kilómetros de profundidad. No obstante, a partir de medidas del flujo de calor en la superficie terrestre de las ecuaciones de la transmisión de calor por conducción, puede obtenerse una distribución teórica de la temperatura con la profundidad en la litosfera. Así en la figura 9 se muestran las curvas de temperatura-Profundidad para la litosfera en océanos y continentes y para distintos valores del flujo de calor.



**Figura 9** Variación de la temperatura con la profundidad en continentes océanos para diferentes valores del flujo de calor (en mWm<sup>-2</sup>). TF es la temperatura del comienzo de la fusión del manto. La profundidad de la intersección de las curvas con la recta  $T=0,085 TF$  puede ser utilizada como definición del espesor de la litosfera (según Pollack y Chapman 1977)

Las medidas de flujo calorífico varían según los autores. Así, Lee (1970), recopilando datos existentes hasta el momento, obtuvo valores medios para el conjunto de la Tierra de 61 mWm<sup>-2</sup>, y no encontró diferencias importantes entre continentes y océanos. Posteriormente otros autores (Chapman y Pollack 1975; Davies 1980; Sclater y otros 1980) han encontrado mayores diferencias entre continentes y océanos como consecuencia de la alta pérdida de calor que se produce en las dorsales oceánicas y que había sido anteriormente infravalorada; de este modo, el flujo de calor medido entre continentes oscila, según los autores, entre 53 y 57 mWm<sup>-2</sup>, mientras que en los océanos se han obtenido estimaciones entre 78 y 100 mWm<sup>-2</sup>. Multiplicando el flujo global medio por la superficie de la Tierra se obtiene una estimación del calor total perdido a través de la superficie terrestre por unidad de tiempo, el cual es del orden de  $3,55 \times 10^{13}$  W.

A partir de las medidas disponibles en la actualidad, se observa que existe una correlación bastante clara entre el flujo de calor y la edad de las rocas del lugar donde se realiza la medida, decreciendo el flujo de calor al aumentar la edad cortical (Figura 10). Esto ha sido interpretado como un efecto de la erosión, la cual da lugar, en la corteza continental a la eliminación de las rocas superficiales, que son las que en mayor concentración de isótopos radiactivos productores de calor.

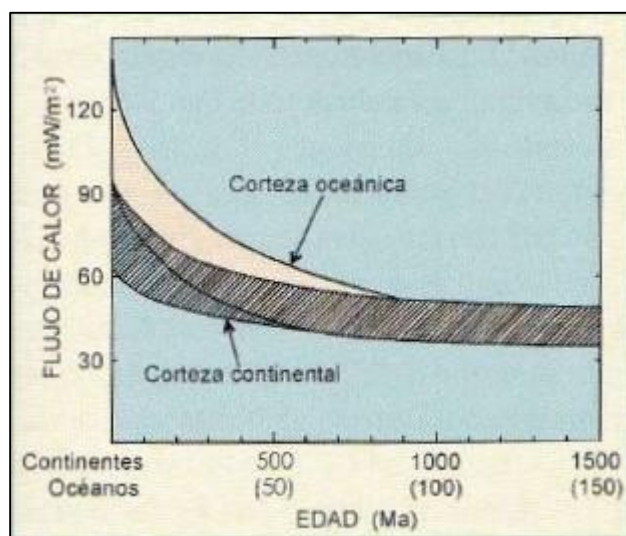


*Figura 10 Variación del flujo de calor medio de las rocas en función de su edad para corteza continental y oceánica (Sclater 1972 y Morgan 1985).*

Existen determinadas regiones donde el flujo de calor es anormalmente alto. En las áreas oceánicas, estas regiones coinciden con las dorsales oceánicas, en las cuales el flujo de calor es muy variable, oscilando entre 50 y 200  $\text{mWm}^{-2}$ ; el flujo desciende, por otro lado, al aumentar la distancia a las dorsales oceánicas. Sobre las áreas continentales, la distribución del flujo es más compleja, siendo más alto el flujo en las cordilleras recientes que en las áreas más estables, lo cual parece estar en relación con el engrosamiento cortical que se asocia al desarrollo de las cordilleras. A veces, un alto flujo puede estar asociado a una mayor concentración de isótopos radiactivos en la corteza de la región o al desarrollo de vulcanismos. En los escudos continentales aparece el flujo de calor más bajo y uniforme oscilando entre 30 y 40  $\text{mWm}^{-2}$ . También puede establecerse una correlación entre el espesor de la litosfera y el flujo de calor, tanto en áreas continentales como oceánicas, correspondiendo un mayor flujo de calor a las zonas con litosfera delgada.

### 1.6.1 Transmisión de calor en el manto

Para estimar la temperatura en el manto en el núcleo son necesarios métodos indirectos. Por un lado, los gradientes geotérmicos calculados para la litosfera deben disminuir por debajo de ella, ya que si no el conjunto del manto aparecería en estado líquido. Por otro lado, los rápidos aumentos en la velocidad de las ondas sísmicas desde los 400 a los 700 km de profundidad aportan un argumento importante para decir la temperatura a esta profundidad. Este incremento de velocidad se interpreta que es debido a los cambios de fase que tiene lugar a la profundidad de 400 km, los cuales han sido repetidos en el laboratorio, o que sugiere una temperatura de unos  $1500^{\circ}\text{C}$  para dicha profundidad. Análogamente, la temperatura estimada teóricamente para la profundidad de 700 km es de unos  $1900^{\circ}\text{C}$ . La temperatura en el límite manto-núcleo debe exceder el punto de fusión de hierro, para explicar la existencia de un núcleo exterior líquido y permanecen por debajo del punto de fusión en el manto, ya que este es sólido; estos argumentos sugieren una temperatura de unos  $3000^{\circ}\text{C}$ . Por consideraciones análogas, se estima que la temperatura en el límite entre el núcleo externo y el interno debe ser del orden de los  $4000^{\circ}\text{C}$  (Stacey 1977). Las anteriores conclusiones sobre la distribución de la temperatura en el interior de la Tierra se encuentran resumidas en la Figura 11



**Figura 11** Gráfica en la que se muestra el campo dentro del cual varían las temperaturas en función de la profundidad (según Ranalli 1987)

En el manto, la transmisión de calor por conducción no parece un mecanismo efectivo, ya que, dado el espesor del manto, este proceso de transmisión implicaría un gran periodo de tiempo, mayor incluso que la edad de la Tierra. La radiación parece un mecanismo improbable, ya que el manto es un cuerpo relativamente opaco. En consecuencia, en el manto, el mecanismo más eficaz de transmisión de calor debe ser la convección. Este mecanismo es eficaz en flujos. El manto, desde el punto de vista sismológico se comporta como un sólido: sin embargo debe tenerse en cuenta que un material que para esfuerzos altos y de corta duración se comporta como un sólido, puede comportarse como una sustancia viscosa cuando los esfuerzos son aplicados durante largo tiempo, sobre todo cuando dicha materia se encuentra sometida a altas temperaturas y presiones, tal como sucede en el mundo. En estas condiciones, la convección se convierte en un mecanismo plausible.

El modelo de convección debe de ser complicado como consecuencia de la heterogeneidad del manto, debida a la existencia de cambios de fase y de viscosidad y a la distribución de las fuentes térmicas. Por consiguiente, aunque la convección en el manto es unánimemente admitida, existen numerosos interrogantes sobre sus características. Así por ejemplo se discute si la convección abarca al conjunto del manto (Runcorn 1962; Peltier 1980) o si, por el contrario, existen células de convección separadas para el manto superior y para el manto inferior (Richter y McKenzie 1981). Esta discusión sobre la escala a la que se produce la convección no afecta solo al plano vertical sino también a las dimensiones en planta de estas células de convección. Otro aspecto que se discute es si la convección representa un flujo estable o si por el contrario, se trata de un proceso más o menos episódico; las investigaciones de Bott (1964) y Anderson (1982) apuntan más a este último sentido.

## **1.6.2 Estudio geológico en la mitad occidental de España**

En zonas continentales, aproximadamente un 60% del flujo del calor procede del enfriamiento de los niveles sublitosféricos y el 40% restante del calor generado por la desintegración natural de elementos radioactivos, principalmente de la corteza (Pollack y Chapman, 1977). El valor medio de flujo de calor observado en áreas continentales es de 57 mW/m² y en áreas oceánicas de 66 mW/m² (Sclater et al., 1980). El flujo de calor superficial

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

proporciona información para establecer el régimen térmico en la litosfera, para delimitar la extensión, intensidad y origen de las anomalías térmicas, y para determinar áreas potenciales de recursos termales. En los últimos cinco años se ha producido un importante avance en la adquisición de datos geotérmicos y determinaciones de flujo de calor en España: en el noroeste peninsular (ITGE, 1990), en el Banco de Galicia (Louden et al., 1991), en las Baleares (Fernández y Cbal, 1992), en la Cuenca Catalano-Balear (Foucher.et.al., 1992; Negredo.et.al., 1994), en las Béticas y sudoeste peninsular (ITGE, 1993), en el Este de la Cuenca del Ebro (Cabal y Fernández, 1995) y en el mar de Alborán (Polyak.et.al, en prensa).

El flujo de calor superficial es un parámetro que no es directamente medible. En condiciones de transporte de calor por conducción el resultado del producto entre el gradiente geotérmico y la conductividad térmica del medio, (*Ley de Fourier*, Ecuación 25):

$$q = -K \cdot \text{grad}T$$

*Ecuación 25*

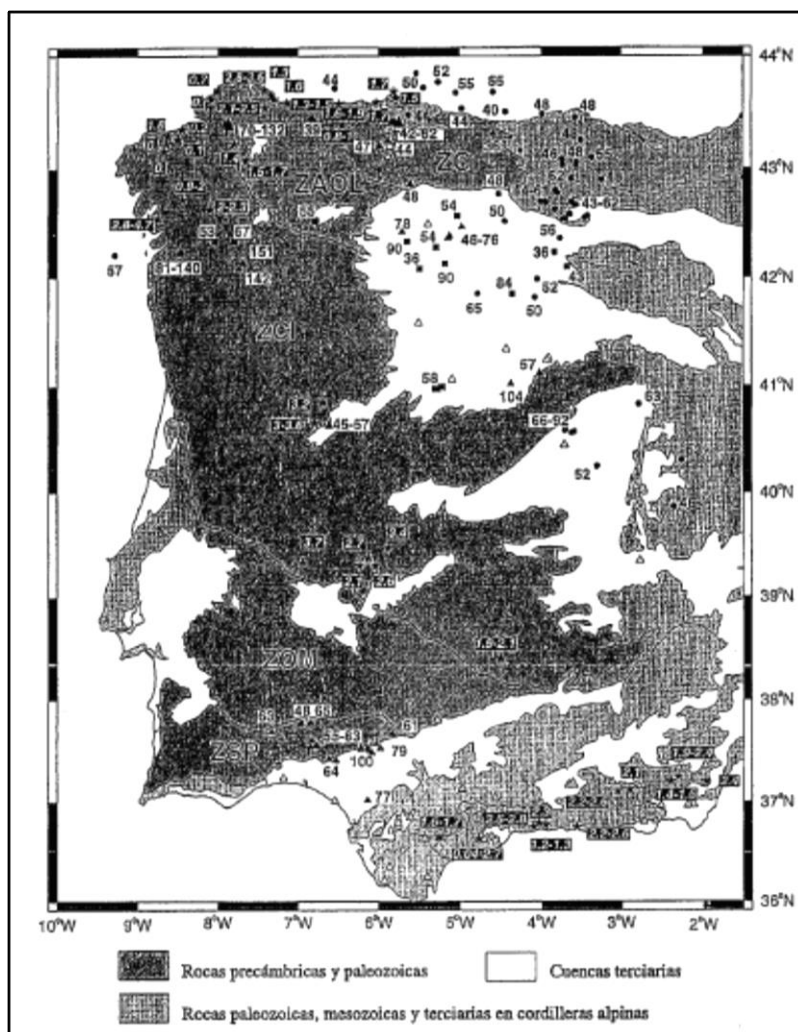
El gradiente geotérmico se obtiene de la medida de temperaturas a diferentes profundidades. La conductividad térmica se mide en laboratorio sobre testigos tomados en sondeos, muestras tomadas en afloramientos cercanos representativas de las litologías atravesadas por los sondeos o por estimación con medidas realizadas en litologías similares. El producto se realiza en los tramos lineales de la termometría del sondeo, se calcula entonces el gradiente térmico medio por mínimos cuadrados y la conductividad promediada en ese tramo. Finalmente se calcula el flujo de calor medio de los diferentes tramos.

La principal contribución a la producción radiogénica de calor es debida a la integración radioactiva de los isótopos  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  y  $K^{40}$  por su abundancia relativa y su larga vida media. Las concentraciones de estos isótopos se han determinado por espectrometría de rayos gamma, y la producción radiogénica se ha calculado mediante la expresión dada por Rybach (1976).



***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

Las mediciones correspondientes fueron realizadas por el Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” (C.S.I.C), en el marco de sendos convenios de investigación con el Instituto Tecnológico y Geominero de España.



**Figura 12** Los triángulos y círculos representan valores de flujo de calor medidos en sondeos de agua mineros, y en sondeos de petróleo respectivamente. Los cuadrados representan valores de flujo de calor en sondeos de agua sin corregir, y los triángulos blancos sondeos de agua medidos pero no usados en la determinación de flujo de calor. Las estrellas indican valores de producción radiogénica de calor, ZSP: Zona Surportuguesa, ZOM: Zona Ossa-Morena, ZCI: Zona Centroibérica, ZAOL: Zona Asturoccidental Leonesa, ZC: Zona Cantábrica.

Los datos geotérmicos obtenidos en la mitad occidental de España son los siguientes:

**Gradiente geotérmico.** El gradiente geotérmico se ha medido un total de 167 sondeos. Los sondeos de abastecimiento de agua son los que han proporcionado más información debido a su número (dos tercios del total) y por su buen control de las medidas de temperatura y de otros datos complementarios, pero a su vez estos sondeos suelen verse afectados por perturbaciones térmicas debido a su circulación de agua. Estas perturbaciones son importantes en la Zona Asturoccidental-Leonesa y en las Béticas donde los valores de los gradientes térmicos indican circulación de agua en sentido descendente a través de medios carstificados o fisurados. En las cuencas del Tago, Duero y Guadalquivir, donde se observan valores de gradientes muy dispersos, el régimen térmico superficial estaría afectado por circulación de agua en niveles porosos y conexión hidráulica entre acuíferos.

*“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”*

**Conductividad térmica.** Se dispone de 85 mediciones en muestras correspondientes a 30 litologías. Los valores de conductividad se sitúan entre  $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  para margas y lignitos en las cuencas y  $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  para sulfuros masivos al sur del Macizo Ibérico (MI). Desde un punto de vista regional las conductividades han sido estimadas en el sur del MI (valor medio de  $2.8 \pm 0.7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) debido a la presencia de sulfuros cuarcitas y rocas volcánicas ácidas y en las Béticas (valor medio de  $2.9 \pm 0.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) debido a la presencia de dolomías, arenisca y esquistos. Las más bajas son las estimadas en las cuencas del Duero y del Tajo, con un valor medio de  $2 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , por la presencia de arcillas y margas y otras sedimentarias poco compactadas. Dentro del MI hay que destacar que los valores de las rocas metamórficas del sur son más altos que en las del norte, con valores medios de  $2.9 \pm 0.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  y  $2.4 \pm 0.3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  respectivamente.

**Producción radiogénica.** Se dispone de 93 valores de producción procedentes de 640 muestras rocosas medidas en el MI y en las Béticas (Figura 12). En el MI los valores de producción se sitúan: entre 0.9 y  $4.7 \mu\text{Wm}^{-3}$  para las rocas graníticas, entre 0.8 y  $2.3 \mu\text{Wm}^{-3}$  para metasedimentarias y entre 0 y  $0.7 \mu\text{Wm}^{-3}$  para rocas ofiolíticas y catazonales excepto para el gneiss de Santiago, caracterizado por un valor de  $1.8 \mu\text{Wm}^{-3}$ . En las Béticas los valores están entre 1.9 y  $2.7 \mu\text{Wm}^{-3}$  para los granitos, 1.2 y  $3.4 \mu\text{Wm}^{-3}$  para los metasedimentos, y los valores más bajos corresponden a las peridotitas, del orden de  $0.05 \mu\text{Wm}^{-3}$ .

**Flujo de calor superficial.** Se presentan 108 determinaciones del flujo de calor. Para ello se han seleccionado sondeos cuyas termometrías se presentan tramos lineales. En las Béticas se obtiene valores de flujo anómalamente bajos y en la Cuenca del Guadalquivir valores muy dispersos, por tanto no se puede establecer en éstas áreas valores regionales de flujo de calor. En el norte del MI, si se excluyen los datos de Pontevedra y Asturias afectados por circulación de agua, se tiene valores medios de flujo de calor de  $50 \pm 14 \text{ mWm}^{-2}$  y en la zona Surportuguesa (ZSP) de  $70 \pm 20 \text{ mWm}^{-2}$ . En la Cuenca Mesozoico-Asturiana, la Cuenca Vasco-Cantábrica y el Margen Nordibérico se puede establecer un valor medio corregido de  $54 \pm 15 \text{ mWm}^{-2}$ ; además en éstas áreas, existe bastante concordancia entre los valores de sondeos de abastecimiento de aguas y mineros, y sondeos de petróleo. En las cuencas del Duero y del Tajo los valores medios son de  $57 \pm 30 \text{ mWm}^{-2}$  y de  $63 \pm 25 \text{ mWm}^{-2}$  respectivamente.

El régimen térmico superficial está caracterizado por perturbaciones térmicas producidas por circulación subterránea de agua a través de la formación y/o del sondeo. Dichas perturbaciones afectan sobre todo a las cadenas montañosas del norte del MI, a las Béticas y sus cuencas internas, y a algunos sondeos de las cuencas del Duero, Tajo y Guadalquivir. En particular en las Béticas a pesar de disponer de gran número de medidas no ha sido posible establecer un valor regional del flujo de calor. Los valores obtenidos de producción radiogénica de calor son cogerentes con el tipo de litología (Rybach 1976; Wollenberg y Smith 1987) y se observa la relación directa entre la producción radiogénica de calor y el grado de acidez de las rocas.

Los valores de flujo de calor regional en el MI están de acuerdo con los valores medios propuestos por Sclater et al. (1980),  $62 \pm 20 \text{ mWm}^{-2}$  para una corteza de edad hercínica y por Chapman y Furlong (1977),  $60 \pm 18 \text{ mWm}^{-2}$  para una corteza con últimos eventos tectonotermiales tardi-hercínicos. Sin embargo, en la ZSP se observa un valor medio de flujo de calor regional un 20% más elevado que el correspondiente a la mitad norte del MI. Este hecho sugiere que, o bien la litosfera está adelgazada en la ZSP o que existen diferencias notables entre la producción radiogénica de calor de las litologías representativas en las zonas donde se dispone de medidas de flujo de calor superficial. Para cuantificar la influencia de cada uno de estos factores se utiliza la relación propuesta por Birch, 1968 (Ecuación 26).



***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

$$q_0 = q^* + bA_0$$

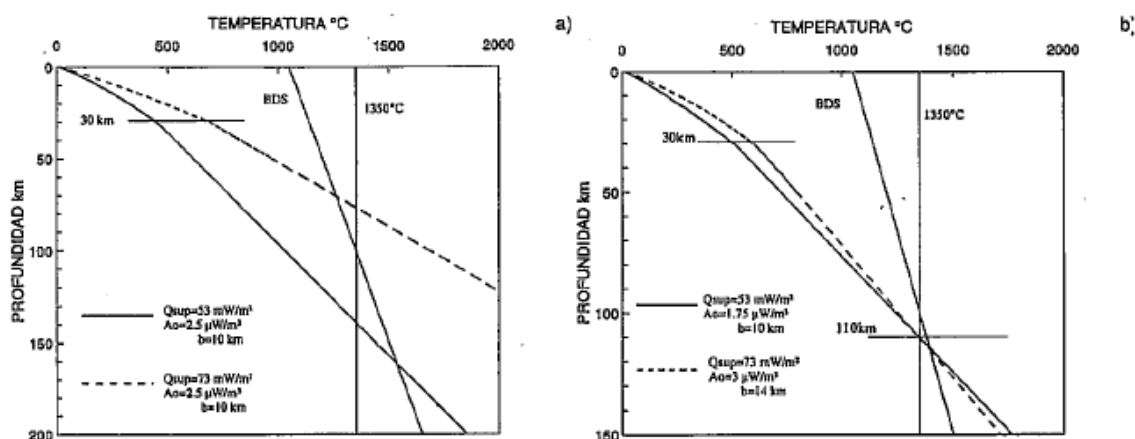
*Ecuación 26*

Siendo  $q_0$  el flujo de calor superficial,  $q^*$  el flujo de calor debajo de una capa productora de calor con una producción radiogénica de calor en superficie de  $A_0$  y un decaimiento de ésta con la profundidad relacionado con la constante  $b$ . Se extiende esta relación, propuesta para plutones, a rocas metamórficas (Jaupart et al., 1982). Considerando un decaimiento exponencial de la producción radiogénica de calor con la profundidad, se llega a una profundidad en la que la producción es despreciable. Esta profundidad suele coincidir con la base de la corteza, siendo entonces  $q^*$  el flujo de calor procedente del manto litosférico (Lachenbruch 1970).

Para el análisis se necesita datos de flujo de calor y producción radiogénica superficial ( $A_0$ ) en un mismo punto. Se toman siete sondeos de la ZCI y ocho de la ZSP (Figura 12). La ZCI contiene grandes masas graníticas en las que se han realizado gran número de medidas de  $A_0$ . No obstante, las mediciones de flujo de calor en granitos presentan perturbaciones por circulación de agua a través de fracturas profundas (Fernández et al., 1995), y por tanto han sido excluidos del estudio. Los sondeos utilizados corresponden a litologías que incluyen pizarras, esquistos y areniscas. El valor medio de flujo de calor es de  $53 \pm 10 \text{ mWm}^{-2}$ , y el valor medio de flujo  $A_0$ ,  $1.75 \pm 0.75 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$ , ha sido estimado a partir de mediciones realizadas en litologías similares (ZAOL). En los sondeos de la ZSP, que atraviesan, fundamentalmente, rocas volcánicas ácidas, pizarras y areniscas, el flujo de calor superficial medio es de  $73 \pm 15 \text{ mWm}^{-2}$ . En este caso, debido a la ausencia de medidas en litologías similares, la  $A_0$  media  $3 \pm 1 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$ , ha sido estimada a partir de valores tabulados por Wollenberg y Smith (1987).

Como primera hipótesis se supone que la diferencia en flujo de calor es, exclusivamente, debida a diferencias de grosor litosférico. Dadas las incertidumbres en los valores de  $A_0$  y dado que los errores se solapan, se asume un valor medio de  $A_0$  de  $2.5 \text{ } \mu\text{Wm}^{-3}$ , igual en ambas zonas. La construcción de las geotermas, con una constante de decaimiento standard de 10 km, y un grosor cortical de 30 km (Banda, 1988), conduce a una diferencia de grosor litosférico (corte con la isoterma de  $1350^\circ\text{C}$ ) de 60 km (Figura 13a). No obstante, no existe ninguna evidencia que confirme la existencia de un adelgazamiento litosférico de esta índole. Por el contrario, dicho adelgazamiento correspondería a una diferencia en la altura geoidal de 14 m, muy superior al 1.5-2 m observado que, como mucho, reflejaría un adelgazamiento litosférico de unos 10 km. Además, este adelgazamiento produciría una diferencia de flujo de calor sublitosférico ( $q^*$ ) de  $20 \text{ mWm}^{-2}$ , extremadamente elevado para una región termotectónica estable, como es el MI.

Como segunda hipótesis, se supone que el espesor litosférico es el mismo en las dos áreas, 110 km (Torné et al., 1985), y se consideran diferentes valores de  $A_0$ . Las geotermas, que ahora están restringidas a cortar la isoterma de  $1350^\circ\text{C}$  a 110 km de profundidad (Figura 13b), para un espesor cortical de 30 km, conducen a valores de la constante de decaimiento de 10 km en la ZCI y 14 km en la ZSP. Por tanto la concentración de elementos radioactivos sería más superficial en la ZCI que en la ZSP. Además se obtiene una diferencia de flujo de calor sublitosférico de  $4 \text{ mWm}^{-2}$ , que concuerda perfectamente con una región térmicamente estable.



**Figura 13a)** Geotermas calculadas bajo condiciones de decaimiento exponencial y producción radiogénica iguales en las dos áreas, Zona Centroibérica (línea continua) y Zona Surportuguesa (línea discontinua) del Macizo Ibérico. **b)** Geotermas calculadas considerando valores estimados de producción radiogénica de calor y con la restricción de grosor litosférico de 110 km (corte con la isoterma de 1350 °C).  $Q_{sup}$  = flujo de calor superficial,  $A_0$  = producción radiogénica de calor,  $b$  = constante de decaimiento, BDS = basalt dry solidus

En consecuencia, la diferencia de flujo de calor observada entre el norte y el sur de MI estaría determinada por variaciones de la  $A_0$ . Según esta hipótesis, los valores de flujo de calor correspondientes a las zonas graníticas de la ZCI deberían ser del orden o incluso mayores que los obtenidos en la ZSP, ya que la  $A_0$  de estas masas graníticas varía entre 2.5–4  $\mu\text{W/m}^3$ . De hecho, el flujo de calor medio de sondeos petroleros a lo largo del margen portugués, entre 40°N y 42°N, muestra valores entre 70 y 85  $\text{mW/m}^2$  (Camelo, 1987). En cualquier caso, se deduce que el espesor de la litosfera térmica en el MI se mantiene aproximadamente constante con valores de  $110 \pm 10 \text{ mW/m}^2$ .

## 1.7 ROCAS ORNAMENTALES

El término Roca se define desde un punto de vista geológico como un “agregado de partículas de una o varias especies minerales, originado por procesos naturales de características muy variadas” (Bastida, 2005). De acuerdo con su génesis, las rocas se dividen en

- Rocas sedimentarias, están formadas por consolidación de materiales depositados en áreas deprimidas, denominadas cuencas.
- Rocas ígneas, están formadas por el enfriamiento y solidificación de un fluido, denominado magma.
- Rocas metamórficas, son el resultado de transformaciones mineralógicas y estructurales en estado sólido que se producen en rocas preexistentes.

Estos tres grupos se diferencian como consecuencia de un origen muy diferente debido a procesos geológicos distintos que condicionan la composición y características de las rocas. Por lo que, la utilización de una Roca Ornamental para pavimento de exterior, de interior, fachadas, revestimientos exteriores o interiores, etc., está condicionado por las propiedades de la roca y estas por el proceso natural por el que se ha originado y que la diferencia del resto de las rocas por dos características fundamentales: composición mineral y textura. Así, las rocas que pertenecen a un mismo grupo genético presentan similitudes en sus características petrográficas y en sus propiedades físicas (Esbert et al., 1997). Sin embargo, entre grupos genéticos distintos,

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

las propiedades son muy variables y diferentes, por lo que todas las rocas no pueden ser utilizadas con el mismo fin.

Se denomina Roca Ornamental o Piedra Natural, a las rocas presentes en la corteza terrestre que son extraídas y elaboradas por el hombre para ser utilizadas como material de construcción con dos fines: uno estético y otro de calidad.

Los requisitos que se exigen a una roca para ser Roca Ornamental son, fundamentalmente (Bustillo y Calvo Sorando, 2002):

- Suficiente Resistencia Mecánica (capacidad de un material para soportar cargas sin deformarse o romperse).
- Resistencia a la alterabilidad (respuesta a las condiciones ambientales, climáticas o de contaminación).
- Vistosidad y belleza (después del pulido o de un tratamiento)

Existen tres grandes grupos de Rocas Ornamentales: granitos, mármoles y pizarras, que incluyen tipos rocosos que no se corresponden con su clasificación petrográfica. Por otra parte, están la denominadas Piedra de Cantería, entre las que se encuentran las rocas de origen sedimentario detrítico denominadas areniscas. La denominación de Granito Ornamental (Norma UNE 22-170-85) incluye “aquel conjunto de rocas ígneas, de mineralogía diversa, que se explotan en forma de bloques de naturaleza coherente y que se utilizan para decoración, una vez que han sido elaborados con procedimientos tales como aserrado, pulido, tallado, etc...” (Bustillo et al., 2001).

Los usos de las Rocas Ornamentales (Figura 14) son variados y están determinados por las propiedades que las rocas adquieren en su génesis. La determinación de sus componentes petrográficos (minerales, textura, porosidad y espacios vacíos), reflejo de su origen, ayudan a la caracterización de las propiedades tecnológicas de las rocas usadas como materiales de construcción.

|                 | TIPO ROCOSO                                                                                   | UTILIZACIÓN                                                                       |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>GRANITO</b>  | Rocas Plutónicas<br>Granitos<br>Rocas Volcánicas<br>Rocas Subvolcánicas<br>Rocas Metamórficas | Decoración<br>Revestimientos<br>Estructuras                                       |
| <b>MARMOL</b>   | Rocas Sedimentarias<br>Rocas Metamórficas                                                     | Revestimientos verticales<br>Pavimentos interiores y exteriores<br>Arte funerario |
| <b>PIZARRAS</b> | Rocas Metamórficas<br>Pizarras                                                                | Cubiertas en formas de tejas<br>Solados<br>Revestimientos                         |

**Figura 14** *Tabla de los grupos de Rocas Ornamentales y su utilización principal (Bustillo et al., 2001)*

En el mercado de las Rocas Ornamentales, la calidad es un factor condicionante y prioritario. Por ello, se llega a la necesidad de establecer unas normas que regulen las características tecnológicas exigibles a cada tipo de roca en función de su ubicación en la obra, y que permitan valorar la competitividad de las empresas que las comercialicen. Así, nace la necesidad de un estudio exhaustivo de las propiedades de las rocas, la importancia de conocer su génesis y, por tanto, su composición mineral y textura, así como la delimitación clara de las características técnicas exigibles para cada uno de los usos a que se destinan estas rocas.

### 1.7.1 Propiedades físicas de las rocas ornamentales

La determinación de las características de las rocas se basa en el conocimiento que aporta la Geología, y particularmente la Petrología, ya que son los distintos procesos geológicos (exógenos o endógenos) los que condicionan las características principales de las rocas: minerales (composición mineralógica) y modo de agregación de los mismos o textura, donde se incluyen los espacios vacíos: poros y fisuras (Esbert et al, 1997). Todo ello constituye lo que se denominan “características petrográficas” de las rocas.

Estas características petrográficas condicionan las propiedades físicas de las rocas. La calidad y durabilidad de las rocas utilizadas como materiales de construcción van a depender de estas propiedades. Por otra parte, estas propiedades están relacionadas con la historia genética de las rocas que condiciona las características petrográficas de las mismas.

Las propiedades físicas de las rocas se pueden resumir en (Esbert et al., 1997):

- Propiedades que caracterizan el aspecto y la constitución física de las rocas: color, densidad, porosidad.
- Propiedades que caracterizan el comportamiento de las rocas frente al agua: absorción de agua, expansión hídrica, succión capilar, permeabilidad al vapor de agua, higroscopicidad.
- Propiedades que caracterizan el comportamiento deformacional de las rocas: mecánicas, térmicas, dinámicas.

Estas propiedades físicas se determinan mediante ensayos normalizados que proporcionan unos valores numéricos como respuesta del material frente a determinadas acciones, y que ayudan a conocer su comportamiento, una vez utilizadas en construcción. Por ello, la caracterización o determinación de las características tecnológicas de las Rocas Ornamentales se realiza a través de normas aceptadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN).

Los ensayos de caracterización de las rocas se rigen por las normas UNE-ENE que exigen los requisitos necesarios que deben cumplir todas las rocas que vayan a ser empleadas como materiales de construcción. El empleo de estos ensayos normalizados para la caracterización de las rocas permite unificar criterios técnicos de evaluación y el uso de un lenguaje común en el mercado y en la utilización de la Roca Ornamental. Así, los ensayos normalizados constituyen herramientas objetivas tomadas como referencias de calidad.

Las propiedades más importantes del estudio de transmisividad térmica que se va a realizar, son la porosidad y densidad.

#### 1.7.1.1 Porosidad

La porosidad de las rocas ornamentales es un parámetro de conjunto que se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total de la probeta o roca. La porosidad de la roca se puede clasificar dependiendo del grado de interconexión con el exterior. Se define la porosidad abierta, conectada o efectiva de la roca, como el volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior, de forma que un fluido puede ser transportado a su través. Por el contrario, la porosidad cerrada, aislada o no comunicada, como su nombre indica, es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior (Dullien, 1992).

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

En particular, la porosidad abierta juega un papel determinante en el deterioro de las rocas ornamentales debido a la conexión con el exterior de la roca. Por ello su caracterización es importante para evaluar la durabilidad de la roca frente a la acción de los agentes externos, y por lo tanto su adecuación para un determinado uso.

La suma de la porosidad conectada y la no conectada se denomina porosidad total de la roca. La porosidad total es un parámetro de conjunto muy importante de las rocas debido a que controla sus propiedades mecánicas. Se puede evaluar por métodos directos, como el microscopio óptico y el electrónico; o por medio de métodos indirectos en los que una propiedad física depende del valor de la porosidad total de la roca, como la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, difracción de Rayos X (o neutrones) de bajo ángulo, resistividad eléctrica, etc.

Las rocas ornamentales porosas tienen una porosidad muy variable, tanto en valor (la mayoría se pueden incluir en el rango 5-40% como en su grado de conexión con el exterior (por ejemplo, la mayoría de la porosidad de la areniscas es abierta, mientras que las tobas volcánicas presentan una fracción de porosidad cerrada importante). Las rocas poco porosas y fisuradas, como los granitos y mármoles comerciales, y las muy fisuradas, como las pizarras, tienen la porosidad muy baja. Las discontinuidades contribuyen muy poco a la porosidad, es decir, la relación del volumen de discontinuidad y el volumen de la roca es muy pequeño.

### **1.7.1.2 Densidad**

La densidad es un parámetro físico básico en la caracterización de las rocas que depende fuertemente de su composición mineralógica y porosidad. Dicho parámetro se recoge en diferentes especificaciones, como la ASTM, para la utilización de las rocas ornamentales para edificación. En función de la fracción de porosidad que se considere, se puede definir diferentes tipos de densidad, como la densidad real, de conjunto y aparente.

El comportamiento de la densidad aparente y la porosidad es inverso. Así, cuanto mayor sea la densidad aparente, menor es la porosidad, lo que condiciona una menor capacidad de la roca para absorber agua.

La porosidad influye tanto en las propiedades físicas de la roca, como en la durabilidad y calidad del material. Una roca porosa absorberá más agua, por lo que sus minerales serán más susceptibles al ataque por el propio agua o por otros agentes químicos. En la Figura 15 se observan valores de densidad y porosidad en tipos de rocas utilizadas en construcción.

| <b>Roca</b>            | <b>Densidad de la roca seca (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Porosidad abierta (%)</b> |
|------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|
| Mármol de Macael       | 2.7                                                | 0.5                          |
| Arenisca de Villamayor | 1.7                                                | 33                           |
| Caliza de Páramo       | 2.4                                                | 9                            |
| Dolomía de Boñar       | 2.3                                                | 15                           |
| Granito de Axeitos     | 2.6                                                | 2                            |

***Figura 15 Tabla de la densidad y porosidad de rocas utilizadas en construcción (Esbert et al, 1997)***

Los datos de densidad real y aparente, porosidad abierta y total son de gran utilidad a la hora de diseñar la distribución de cargas para el transporte. La porosidad abierta y total condiciona en las rocas comportamientos alterológicos, determinando así su durabilidad.

## 1.7.2 Ensayos para la caracterización de rocas ornamentales

La caracterización de una Roca Ornamental consiste básicamente en la descripción de las cualidades del material rocoso, a nivel de sus componentes más básicos (o caracterización intrínseca) y del conocimiento de sus propiedades físicas (o caracterización del comportamiento), así como del conocimiento de la respuesta del material a distintas situaciones ambientales (o caracterización alterológica).

Para ello, se realizan ensayos normalizados que dan un valor numérico a la calidad de la roca, ayudan a interpretar su comportamiento en su puesta en obra, así como determinan cuál va a ser su ubicación idónea (pavimento exterior, interior.....) y su durabilidad. A su vez, este valor numérico permite comparar distintos tipos de roca (Figura 16).

| TIPO                                         | ENSAYO                                     | NORMA                                                                                                  |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ensayos de caracterización intrínseca</b> | Análisis químico                           | Sin norma UNE                                                                                          |
|                                              | Estudio petrográfico                       | UNE-EN 12407:2000                                                                                      |
|                                              | Densidad Real y Aparente                   | UNE-EN 1936:1999 y UNE-EN                                                                              |
|                                              | Porosidad abierta y total                  | 13755:2002                                                                                             |
| <b>Ensayos de comportamiento hídrico</b>     | Coefficiente de Absorción Capilar          | UNE-EN 1925 :1999                                                                                      |
|                                              | Expansión Hídrica                          | International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts.vol16nº2pp 141-156 |
| <b>Ensayos de caracterización mecánica</b>   | Resistencia a la flexión                   | UNE-EN 12372:1999                                                                                      |
|                                              | Resistencia a la compresión                | UNE-EN 1926:1999                                                                                       |
|                                              | Microdureza Knoop                          | UNE-EN 22188:1985                                                                                      |
|                                              | Resistencia al choque                      | UNE-EN 22189:1985                                                                                      |
|                                              | Resistencia al anclaje                     | UNE-EN 13364:2002                                                                                      |
|                                              | Resistencia al deslizamiento sin pulimento | UNE-EN 1341:2002<br>UNE-EN 1342:2003                                                                   |
| <b>Ensayos de envejecimiento acelerado</b>   | Humectación y secado                       | Ensayo no normalizado.                                                                                 |
|                                              | Cristalización de sales                    | UNE-EN 12370:1999                                                                                      |
|                                              | Niebla ácida y niebla salina               | UNE-EN 12326-2:2000                                                                                    |
|                                              | Heladicidad                                | UNE 22184:1985<br>UNE-EN 12371:2002                                                                    |
|                                              | Choque térmico                             | UNE-EN 14066:2003                                                                                      |
|                                              | Resistencia a la abrasión                  | UNE-EN 1341:2002                                                                                       |
|                                              |                                            | UNE-EN 1342:2003                                                                                       |

**Figura 16 Tabla de eEnsayos de caracterización de las Rocas Ornamentales y normas**

El Estudio Petrográfico consiste en la descripción microscópica de una lámina delgada de la roca. En él se determinan parámetros petrográficos que influyen en el comportamiento de la roca frente a los ensayos de caracterización. Así, se determina la composición mineral, el tamaño y forma de los minerales, la existencia de espacios vacíos (poros o fisuras) y la relación entre todos los componentes de la roca o textura. Aquellas características petrográficas de los materiales rocosos que más directamente se relacionan con su comportamiento, especialmente para su empleo como piedras de construcción son las descritas en la Figura 17



**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

Los datos aportados mediante el Estudio Petrográfico permiten clasificar correctamente la roca desde un punto de vista petrológico. El comportamiento tecnológico de una roca va a depender de dos variables determinadas en este ensayo: componentes minerales y textura.

|                            |                                                                                                                                           |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Textura</b>             | Relaciones espaciales entre los componentes<br>Fase aglomerante: cemento, matriz<br>Anisotropías y heterogeneidades<br>Granos y cristales |
| <b>Mineralogía</b>         | Naturaleza de las especies minerales<br>Porcentaje en volumen de cada especie mineral<br>Grado de alteración de los minerales             |
| <b>Composición química</b> | Análisis químico cualitativo y cuantitativo                                                                                               |

**Figura 17** *Tabla de las características petrográficas de los materiales rocosos (Esbert et al. 1997).*

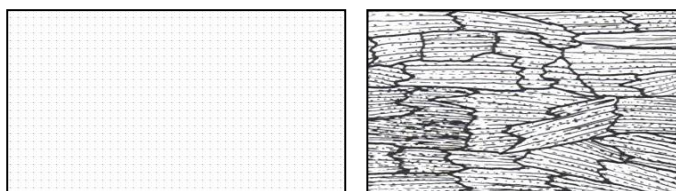
De forma general, se pueden agrupar los tipos de texturas en dos modelos: las texturas cristalinas, propias de las rocas ígneas y metamórficas, entre las que se incluyen variedades masivas (granitos y mármoles) y foliadas (pizarras); y las texturas cementadas, propias de las rocas sedimentarias, tales como las calizas y las areniscas (Figura 18).

|                          |                    |                                             |                                              |          |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|
| <b>ROCAS CRISTALINAS</b> | Textura cristalina | Granos minerales en contacto unos con otros | Variedades masivas                           | Granitos |
|                          | Medios fisurados   |                                             | Variedades foliadas                          | Mármoles |
| <b>ROCAS CEMENTADAS</b>  | Textura detrítica  | Matriz o cemento entre los granos minerales | Areniscas, calizas, dolomías, conglomerados. |          |
|                          | Medios porosos     |                                             |                                              |          |

**Figura 18** *Tabla de clasificación textural de las rocas. (Esbert et al, 1997).*

Un aspecto fundamental de la textura es la existencia de huecos o espacios vacíos, donde se sitúan fases fluidas (agua, aire). La porosidad de las rocas influye de manera importante en su calidad y durabilidad (Figura 19).

La densidad real, la densidad aparente, la porosidad abierta y total se determinan mediante el ensayo hídrico de Absorción de Agua. Este ensayo se puede realizar a presión atmosférica o al vacío.



**Figura 19** *El comportamiento tecnológico de una Roca Ornamental va a depender de su composición mineralógica y de su textura. a) Textura cristalina variedad masiva. b) Textura cristalina variedad foliada. (Castro Dorado, 1989).*

El comportamiento de un tipo rocoso en los ensayos tiene dos factores: uno, propio de la roca y consecuencia de su génesis, se deriva de las características petrográficas de la roca. A establecer relaciones entre petrografía/propiedades de la roca se dedica la disciplina de la petrofísica. El otro factor, es el relativo a las condiciones del ensayo, al tipo, tamaño y características de las probetas utilizadas en los mismos.

Por otra parte, los ensayos tienen mayor o menor importancia dependiendo del uso a que se destine la Roca Ornamental y del tipo rocoso del que se trate. Así, por ejemplo, la Absorción

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

de agua es un factor muy importante en las pizarras para cubiertas y para usos de otro tipo rocoso en el exterior, pero no lo es para pavimentos o revestimientos de interior. La Resistencia a la flexión es muy importante en la utilización de la roca como peldaños de escalera. Sin embargo, el Estudio Petrográfico es aconsejable e importante para todos los usos de las rocas y para todos los tipos rocosos, como lo es la Densidad Real y Aparente o la Porosidad. En las pizarras para cubierta es importante el ensayo de Choque térmico, así como el Módulo de Heladicidad. En los mármoles, es aconsejable conocer los valores de microdureza Knoop para su correcta utilización.

Desde un punto de vista comercial, existen otros aspectos que se deben contemplar a la hora de caracterizar una roca. Uno de ellos es el color. Las rocas son materiales cuyo origen es natural y, por tanto, no perfecto. A diferencia de los materiales artificiales, las rocas son materiales heterogéneos, por ello el color no es uniforme en todas las placas o baldosas obtenidas de un mismo tipo de roca e incluso dentro de la misma cantera la variación puede ser importante. Esta variación cromática es una cualidad que debería ser apreciada como tal, y cuya solución estaría en que sea el propio cantero el que haga una selección del material en cantera controlando la variación cromática de cada partida. La existencia de discontinuidades es un problema que requiere el estudio de un geólogo en la cantera de origen de la roca, así se delimitarían las zonas en las que la densidad de discontinuidades fuera mínima, con un mayor aprovechamiento de la cantera ofreciendo una alta calidad de la roca. De igual modo, el tratamiento de las placas de roca es conveniente para evitar el desprendimiento de fragmentos.

Existen otros problemas relacionados con la durabilidad de la Roca Ornamental. Así, la existencia de hierro y magnesio o la presencia de sulfuros metálicos (pirita) reducen considerablemente la durabilidad de la roca, provocando, en muchos casos la aparición de manchas amarillas imposibles de limpiar



# CAPÍTULO 2:

# OBJETO

## 2 OBJETO

En un mundo que se mueve y evoluciona en gran parte por la existencia de lo que llamamos energía, bien en forma de calor o de combustible, el conocimiento de cómo dicha energía se mueve a través de los diferentes materiales que la naturaleza ofrece o de los artificiales que el hombre ha creado, es cada día un reto mayor en el ahorro energético.

La disipación del calor en los materiales constituye uno de los conocimientos más importantes para construcciones rentables y medioambientalmente sostenibles que permitan ahorrar energía. Por ello, el estudio de la disipación del calor en las rocas, como material de construcción, relacionado con la transmisividad o conductividad térmica en las mismas y su optimización en temas como el aislamiento térmico de las viviendas, adquiere cada día mayor importancia.

Las rocas son utilizadas como materiales de construcción, sus propiedades físicas y químicas las caracterizan desde un punto de vista tecnológico para su ubicación correcta en la edificación. La petrografía de la roca determina su comportamiento ante las agresiones que sufrirá a lo largo del tiempo que forme parte de un edificio y, a su vez, influirán notablemente en el aislamiento del mismo así como en la optimización de la gestión del calor. Por otro lado, la conductividad térmica es una propiedad del material que mide la capacidad para conducir el calor. La determinación de esta propiedad en los materiales es un factor fundamental para realizar estudios de calefacción y acondicionamiento térmico en edificios, como parámetro que indica la cantidad de calor que se pierde o se gana en un ambiente, habitación, etc

Entre las rocas más utilizadas para construcción en Cantabria se encuentran las areniscas, rocas sedimentarias detríticas formadas por granos entre los que existe una porosidad bien cerrada o abierta y que presentan un número determinado de superficies de contacto en función del tamaño de grano. Por ello, para este estudio se han seleccionado areniscas de esta región, que pertenecen a dos edades geológicas distintas: Areniscas del Triásico (Buntsandstein) y Areniscas del Cretácico Inferior (facies Weald).

El objeto de este estudio es conocer el comportamiento de estas areniscas frente a la transmisividad o conductividad térmica. Para ello se someten muestras de estas rocas a un ensayo basado en el Método de la Placa caliente aplicando calor a las muestras, a lo largo de determinados períodos de tiempo, para obtener valores de conductividad térmica y comparando esta propiedad en cada una de ellas, así como con otras propiedades físicas de estas rocas como son la porosidad y la densidad.

# **CAPÍTULO 3:**

## **MATERIAL INVESTIGADO**

## **ARENISCAS DE CANTABRIA**

## 3 MATERIAL INVESTIGADO: ARENISCAS EN CANTABRIA

### 3.1 INTRODUCCIÓN

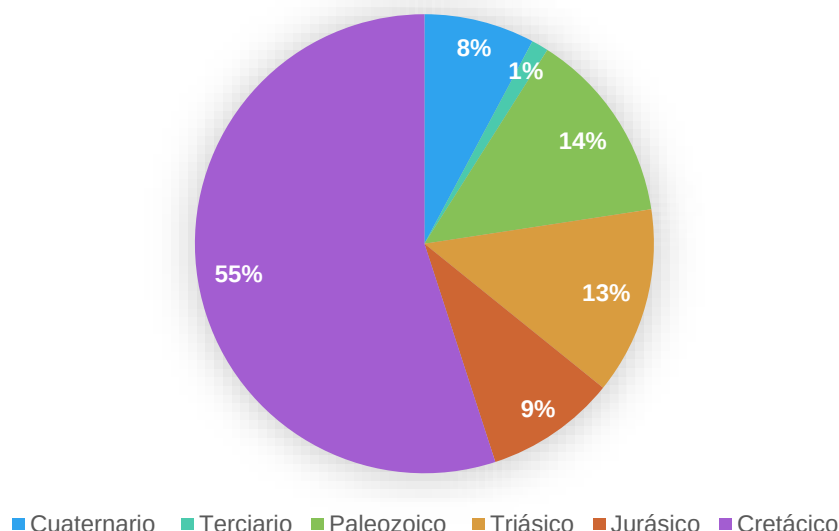
La mayor parte de la Tierra sólida está constituida por rocas ígneas y metamórficas. Los geólogos estiman que de estas dos categorías representan del 90 al 95% de los 16 km más externos de la corteza. Sin embargo, la mayor parte de la superficie sólida de la Tierra está constituida por sedimento o roca sedimentaria. Alrededor del 75% de todas las áreas continentales están cubiertas por sedimentos y rocas sedimentarias. El fondo oceánico, que representa alrededor del 70% de la superficie sólida de la Tierra, está prácticamente cubierto por sedimento. Las rocas ígneas están expuestas solo en la cresta de las dorsales centro oceánicas y en algunas áreas volcánicas. Por tanto, si bien el sedimento y las rocas sedimentarias constituyen solo un pequeño porcentaje de la corteza terrestre, están concentradas en, o cerca de, la superficie, en la interfaz entre la hidrosfera, la geosfera, la atmósfera y la biosfera.

Debido a esta posición única, los sedimentos y las capas de roca que finalmente se forman contienen evidencias de las condiciones y los acontecimientos del pasado en la superficie. Además, las rocas sedimentarias son las que contienen los fósiles, herramientas vitales para el estudio del pasado geológico. Este grupo de rocas proporciona a los geólogos mucha información básica que necesitan para reconstruir los detalles de la historia de la Tierra.

En la Comunidad Autónoma de Cantabria es intensa la explotación de rocas sedimentarias, sobre todo en la mitad norte. Dentro de sus explotaciones de mayor relieve, se encuentran las de calizas, dolomías y areniscas para su uso en la ornamentación.

Los niveles de areniscas más utilizados para estos fines pertenecen al Triásico y Cretácico y se puede observar en la Figura 20.

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***



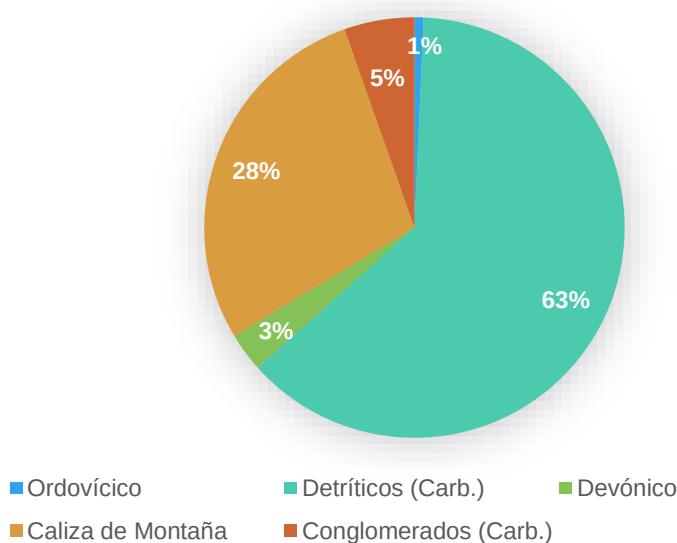
**Figura 20 Gráfico de la estratigrafía de Cantabria**

Los depósitos de areniscas más importantes están constituidos por arenas silíceas asociadas a las facies Weald y a las facies Buntsandstein ( Figura 21, Figura 22, Figura 23).

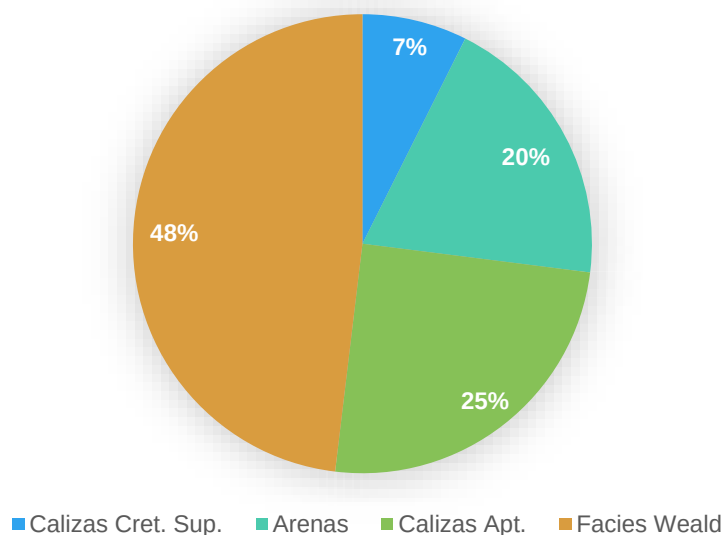
La facies Weald está formada por una potente serie de carácter arcillo-arenoso, en la cual las facies más arenosas, formadas por areniscas silíceas, a veces de carácter carbonoso, compactas y resistentes ocupan las partes altas. En general, la serie es muy variable litológicamente.

La facies Buntsandstein está constituida en la región por arenas y areniscas y areniscas blanco amarillentas, no cementadas, micáceas, que contienen vetas amarillentas y carbonosas.

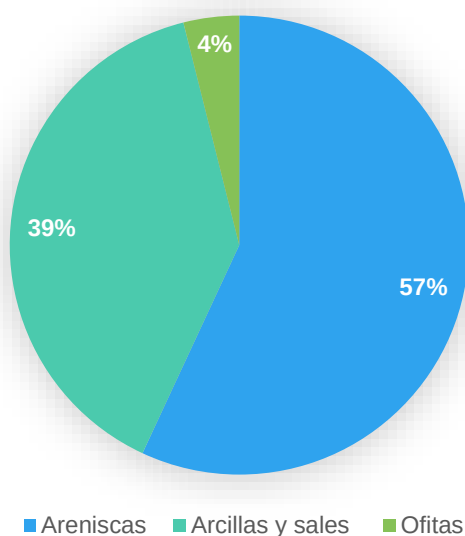
La facies Weald ocupa gran extensión en Cantabria principalmente en su zona central, mientras que los afloramientos de la facies Buntsandstein se encuentran más dispersos.



**Figura 21 Gráfico de la estratigrafía del paleozoico**



**Figura 22 Gráfico de la estratigrafía del cretácico**



**Figura 23 Gráfico de la estratigrafía del triásico**

## 3.2 LA ARENISCA

Las areniscas son rocas detríticas constituidas en más de un 5% por granos de diámetro comprendido entre 2 y 0.065 mm. Constituyen uno de los grandes grupos de rocas sedimentarias. Debido al tamaño de las partículas, estas rocas se originan en medios con una energía cinética relativamente elevada.

El estudio textural y mineralógico de las areniscas se realiza habitualmente mediante el microscópico óptico. Estudios composicionales más precisos y detallados pueden realizarse mediante técnicas de análisis instrumental. Una propiedad importante de las areniscas es el color. Así, las areniscas compuestas esencialmente por cuarzo suelen tener colores blancos o, en general,

---

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

son tonos claros; las de tonos oscuros, grises o negros se caracterizan por la presencia de materia orgánica; las que se encuentran cementadas por óxido férrico presentan tonos rojizos. En una misma composición de la roca esta se hace más oscura al disminuir el tamaño de grano.

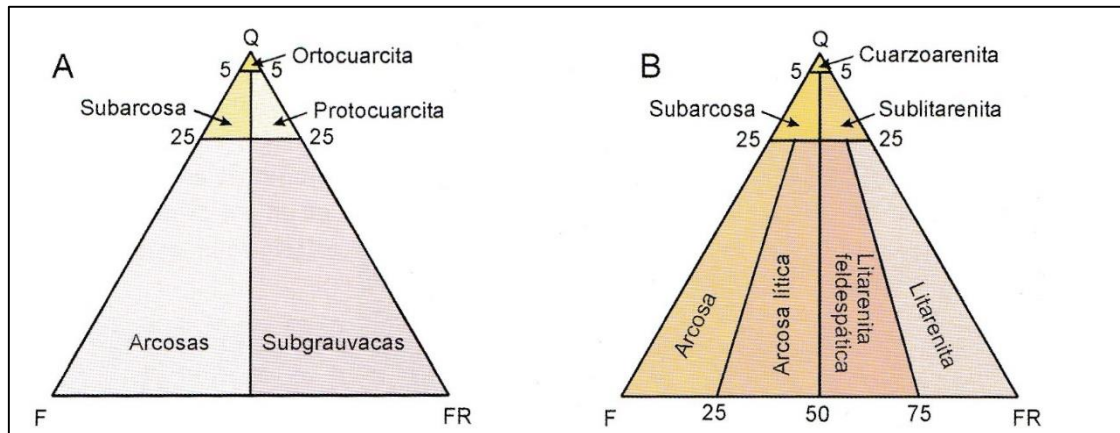
Su clasificación y nomenclatura han sido largamente debatidas, lo cual ha dado lugar a una notable confusión. Los granos de la mayoría de las areniscas son de cuarzo, feldespato y/o fragmentos de roca; en proporción minoritaria pueden aparecer granos de mica clorita y/o dolomita. La matriz está constituida por partículas de tamaño de limo y de tamaño de arcilla; se trata mayoritariamente de granos detríticos de minerales arcillosos o cristales de estos mismos minerales originados en los poros; en este último caso se trata realmente de un cemento.

Un factor importante en las clasificaciones es el porcentaje de matriz. De acuerdo con este criterio, Pettijohn y otros (1987) han dividido las areniscas en dos grupos mayores: areniscas, cuando el porcentaje en matriz es inferior al 15%, y wackes, cuando el porcentaje en matriz es superior al 15%.

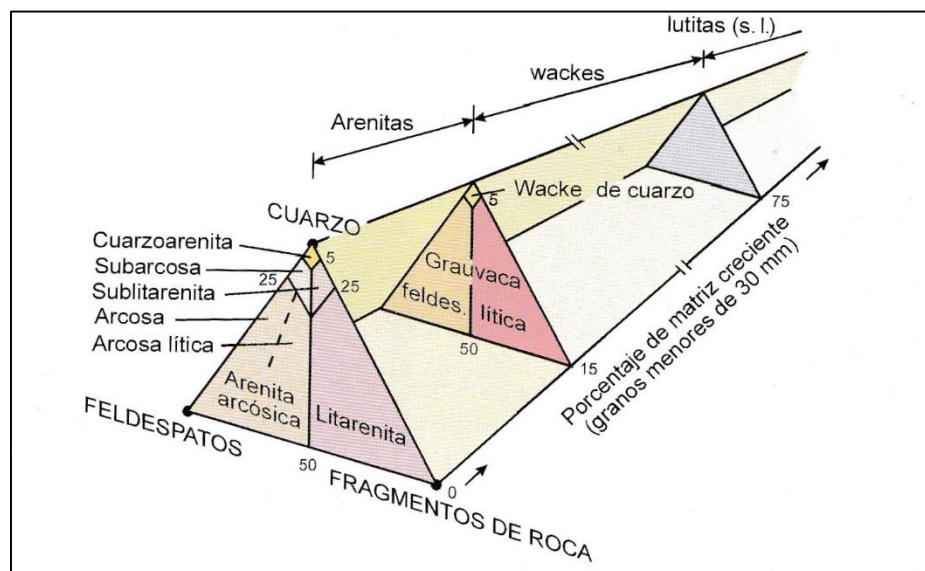
Las clasificaciones más usadas de las areniscas se basan en diagramas triangulares en cuyos vértices se sitúan cuarzo, feldespato y fragmentos de roca. Algunas clasificaciones de este tipo, debidas a Pettijohn (1957), Folk (1968) y Pettijohn y otros (1987), se muestran en la figuras (Figura 24, Figura 25).



**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**



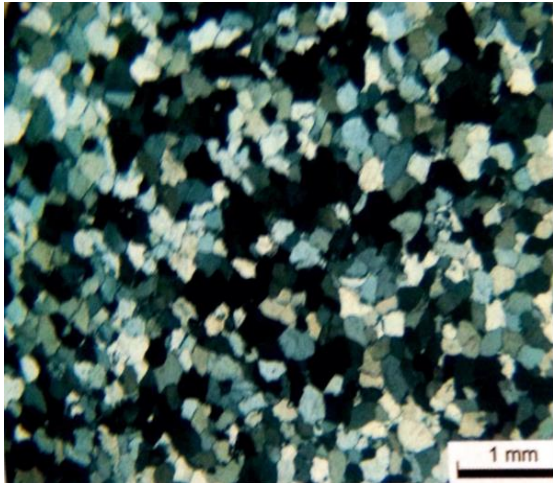
**Figura 24** Clasificaciones de las areniscas en diagramas triangulares Q (cuarzo)-F (feldespato)-FR (fragmentos de roca). A, según Pettijohn (1957). B, según Folk (1968) (Bastida, 2005)



**Figura 25** Clasificación de las areniscas según Pettijohn y otros (1987) (Bastida, 2005)

Deben destacarse que estas clasificaciones se basan en la naturaleza de los granos, ignorándose la naturaleza del cemento o de la matriz. Teniendo en cuenta la terminología de los citados autores, se distinguen los siguientes tipos de areniscas:

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

- **Cuarzo arenitas.** Poseen más del 95% de cuarzo. Son las areniscas que presentan mayor madurez texturas, con sus granos bien redondeados y clasificados. El cemento, cuando existe, es silíceo y aparece como un sobrecrecimiento de los granos, en continuidad óptica con ellos, lo que significa que el grano y el cemento que lo rodea presentan posiciones de extinción coincidentes cuando se observan al microscopio con polarizadores cruzados. Los minerales pesados, tales como el circón y la turmalina, son los más resistentes a la alteración. Su desarrollo implica una fuerte meteorización química y un transporte importante, a no ser que se trate de sedimentos reciclados de otras areniscas maduras. (Figura 26)
- 
- Figura 26 Micrografía con nicoles cruzados**
- **Sublitarenitas (o protocuarzitas).** Presentan un contenido en cuarzo comprendido entre el 75 y 95%, predominando además el contenido en fragmentos de roca sobre el de feldespatos.
  - **Subarcosas.** Presentan un contenido en cuarzo comprendido entre el 75 y el 95%, siendo el contenido en feldespatos superior al de fragmentos de roca.
  - **Arcosas.** Su contenido en cuarzo es inferior al 75% y su contenido en feldespatos es superior al 25%, presentando además algunos fragmentos de roca. Desde el punto de vista químico, son ricas en  $Al_2O_3$  y en  $K_2O$ . Presentan a menudo tonalidades rosadas debido a la presencia del feldespato. Como granos accesorios presentan con frecuencia micas detríticas. Su madurez mineralógica y textural es baja, lo que sugiere que los factores que favorecen su origen son: erosión rápida de rocas ígneas ácidas, meteorización química baja y transporte pequeño o moderado.
  - **Litarenitas (o subgrauvacas).** Su contenido en cuarzo es inferior al 75% y su cantidad de fragmentos de rocas es superior al de feldespatos. Químicamente, son rocas ricas en  $Al_2O_3$  y pobres en  $K_2O$  y  $MgO$ . Su falta de madurez textural y mineralógica implica una alta velocidad de producción de sedimentos y un transporte corto. Cuando los fragmentos de roca son de pizarras la roca se denomina filarenita y cuando son de caliza se denomina calclítica.

Un término ampliamente en el campo es el de cuarcitas. Son areniscas muy resistentes y de tonos claros. Están constituidas mayoritariamente por cuarzo (más del 75%). Presentan entre los granos un cemento silíceo que tiene con ellos una buena continuidad óptica (sobrecrecimiento del cuarzo).

Las wackes representan la transición de arenitas a peltas, pudiéndose dividir en tres grupos: wackes líticas, wackes feldespáticas y wackes de cuarzo; estas últimas son raras. Un término de uso general es el de grauvacas, que se utiliza para referirse a areniscas cuyo porcentaje en matriz oscila entre el 15 y 75%. Se trata generalmente de areniscas oscuras de grano grueso y pobremente clasificadas. Su matriz suele estar constituida por sericita, clorita, minerales arcillosos, y granos de cuarzo y feldespato de tamaño limo. En la fracción de tamaño arena, el

cuarzo suele ser el porcentaje dominante. Son frecuentes los fragmentos de rocas volcánicas ácidas o intermedias. Su composición química suele presentar un alto contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Dado que la terminología de las areniscas se basa en el porcentaje de sus constituyentes, se utilizan a menudo, para poder realizar la clasificación mediante observación microscópica.

### **3.3 FORMACIÓN DE LAS ARENISCAS**

El ciclo de formación de las rocas sedimentarias se produce cerca de la superficie de la Tierra (Figura 27):

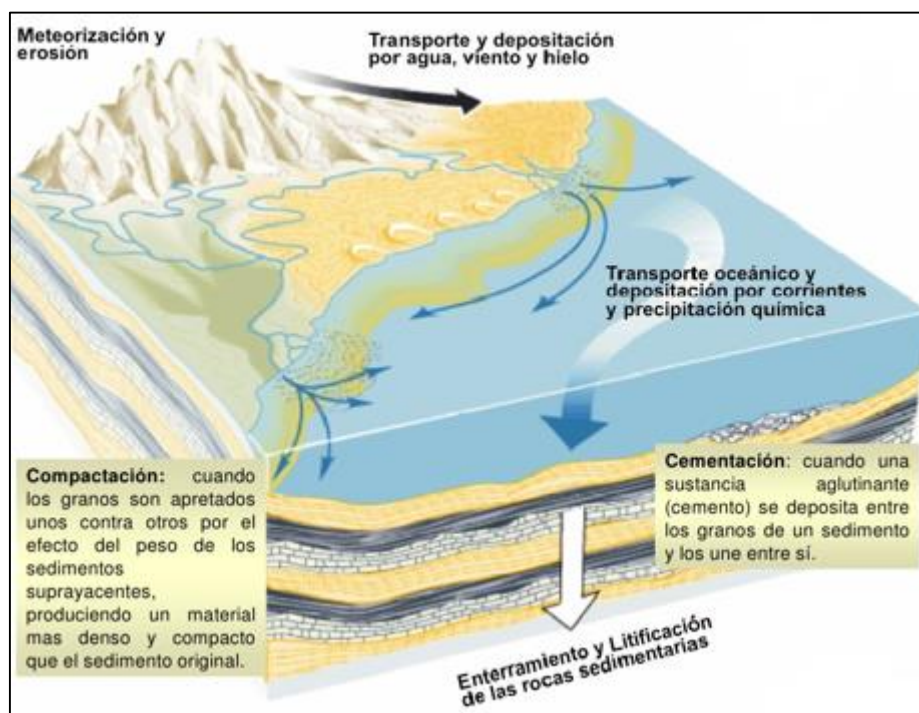
- Primero empieza el proceso de meteorización. Implica la desintegración física y la descomposición química de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias preexistentes. La meteorización genera una variedad de productos, entre ellos diversas partículas sólidas e iones en disolución, que constituyen la materia prima para las rocas sedimentarias.
- Los constituyentes solubles son transportados por el agua de escorrentía y el agua subterránea. Las partículas sólidas son movidas a menudo pendiente abajo por la gravedad (procesos gravitacionales), antes que el agua de superficie, el agua subterránea, el viento y el suelo glacial las retiren. El transporte mueve estos materiales desde las zonas donde se originaron a ubicaciones donde se acumulan. El transporte de sedimento suele ser intermitente. Por ejemplo, durante una inundación, el movimiento rápido de un río desplaza grandes cantidades de arena y grava. A medida que las aguas se retiran, las partículas se depositan temporalmente solo para ser movidas otra vez por una nueva inundación.
- El depósito de partículas sólidas tiene lugar cuando el viento y las corrientes de agua disminuyen de velocidad y a medida que los glaciares se derriten. La palabra sedimentaria se refiere en realidad a este proceso. Procede del latín *sedimentum* que hace referencia al material sólido que se deposita a partir de un fluido (agua o aire). El lodo del fondo de un lago, un delta en la desembocadura de un río, una barra de grava en el lecho de una corriente, las partículas del desierto y una duna, e incluso el polvo doméstico son ejemplos.
- El depósito de materiales disueltos en agua no está relacionado con la fuerza del viento o las corrientes de agua. Antes bien, los iones en disolución son retirados cuando cambios químicos o de temperatura provocan la cristalización o la precipitación del material o cuando los organismos extraen los materiales disueltos para construir sus caparazones.
- A medida que continua la cementación, los sedimentos más antiguos son enterrados debajo de las capas más jóvenes y se convierten gradualmente en rocas sedimentarias (se litifican) por compactación y cementación. Estos y otros cambios se conocen con el término diagénesis, un término colectivo para todos los cambios que tienen lugar en la textura, composición y otras propiedades físicas después de que los sedimentos sean depositados.

Dado que hay una variedad de formas por medio las cuales los productos de la meteorización son transportados, depositados y transformados en roca sólida, se reconocen tres categorías de rocas sedimentarias.

En primer lugar, puede ser una acumulación de material que se origina y es transportado en forma de partículas sólidas derivadas de la meteorización mecánica química. Los depósitos de este tipo se denominan detríticos y las rocas sedimentarias que se forman son rocas sedimentarias detríticas.

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

La segunda fuente principal de sedimento es el material soluble producido en gran medida mediante meteorización química. Cuando estos iones en disolución son precipitados mediante procesos inorgánicos o biológicos, el material se conoce como sedimento químico y las rocas formadas a partir de él se denominan rocas sedimentarias químicas.



**Figura 27 Formación de las rocas sedimentarias (Bastida, 2005)**

La tercera categoría es la de las rocas sedimentarias orgánicas. El principal ejemplo es el carbón. Esta roca combustible negra está formada por carbono orgánico procedente de los restos de plantas que murieron y se acumularon en el fondo de un pantano. Los fragmentos y trozos de material vegetal no descompuesto que constituyen los sedimentos en el carbón son los productos de meteorización que componen las rocas sedimentarias detríticas y químicas.

La arenisca es el nombre que se da a las rocas en las que predominan los clastos de tamaño arena. Después de la lutita, la arenisca es la roca sedimentaria más abundante; constituye aproximadamente el 20% de todo el grupo. Las areniscas se forman en diversos ambientes y a menudo contienen pistas significativas sobre su origen, entre ellas la selección, la forma de grano y la composición.

### **3.4 PETROGRAFIA DE LAS ARENISCAS**

Las rocas sedimentarias están formadas principalmente por tres componentes, con excepción de las rocas de origen exclusivamente orgánico. Estos tres componentes son (Figura 28):

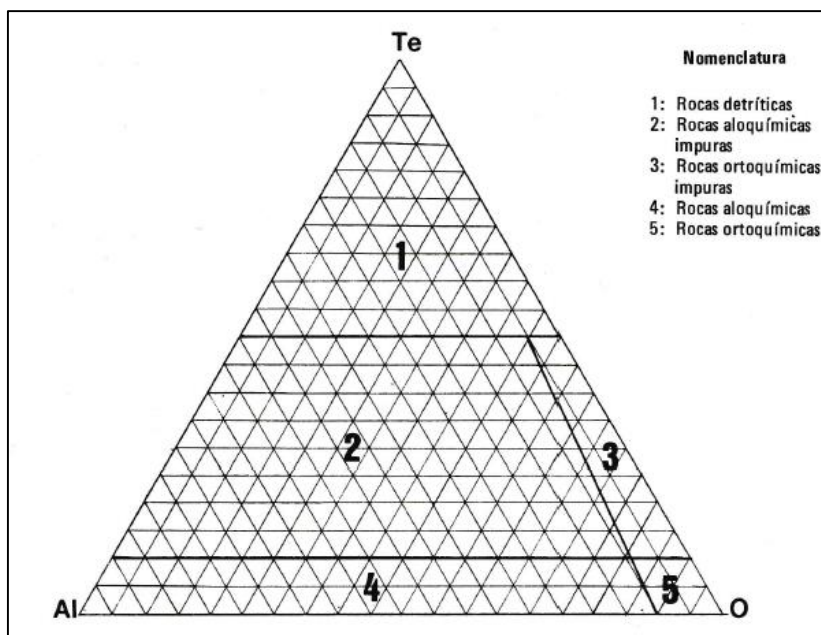
- **Terrígenos.** Son cristales sueltos, fragmentos de cristales y fragmentos de roca, procedentes de rocas preexistentes por alteración y disgregación. Los materiales terrígenos se caracteriza, además por haber sufrido un transporte, más o menos largo y energético, desde



**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

la roca fuente (área madre) hasta la cuenca de depósito, en la que ahora aparecen formando sedimentos y rocas. Los procesos de transporte y sedimentación son los responsables de la morfología de los clastos y de otras características texturales.

- Ortoquímicos. Son los materiales formados por precipitación química directa en la propia cuenca de sedimentación, durante o inmediatamente después del depósito.
- Aloquímicos. Materiales de origen químico, u órgano-químico, forzados en la misma cuenca, pero que han llegado a la zona de depósito como clastos. A veces estos materiales pueden haber sufrido un corto transporte dentro de la misma cuenca.



**Figura 28** Clasificación de las rocas sedimentarias según las proporciones de Te (Terrígenos), Al (aloquímicos) y O (ortoquímicos) (Dorado, 1989)

Las rocas con más del 50% de terrígenos son denominadas rocas detríticas y las que tienen al menos de un 50% de terrígenos reciben diversos nombres según la proporción de aloquímicos y ortoquímicos; estas son en su gran mayoría de composición carbonatada.

Más del 95% de las rocas sedimentarias son detríticas y carbonatadas. Las detríticas constituyen alrededor del 85% y las carbonatas alrededor del 15% (Blatt 1982), de aquí que estos dos grandes grupos sean los que presenten mayor interés petrográfico y sistemático.

Todas las rocas detríticas presentan textura clástica. Los clastos pueden estar, o no, cementados por material ortoquímicos y/o diagenético. Al material que rellena los huecos entre los granos se le llama cemento cuando es de origen diagenético. El cemento suele ser carbonatado, ferruginoso o silíceo en el caso más general.

Los elementos que definen el patrón textural de las rocas detríticas son:

- Tamaño de grano. Tres grandes clases de tamaños de granos son clásicamente aceptadas en rocas detríticas:
  1. Grava (mayor de 2mm)
  2. Arena (entre 2mm y 62 micras)
  3. Fango (menos de 62 micras)

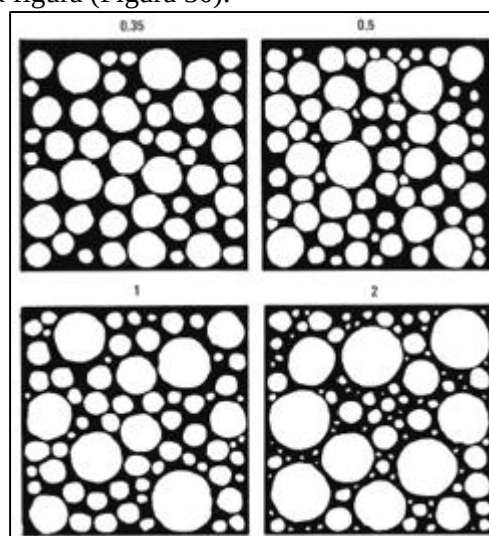
**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

Las subdivisiones de estas tres clases se muestran en la tabla (Figura 29Figura 29), junto con los nombres de rocas para cada clase de tamaño considerada. Cuando existe una fuente dispersión de tamaños de grano en la misma roca, se pueden combinar los nombres antes indicados, figurando en primer lugar el que corresponde al tamaño de mayor frecuencia.

| Diámetro |        |      | Clase |                  | roca          |
|----------|--------|------|-------|------------------|---------------|
| mm       | micras | Ø    |       |                  |               |
| 4.096    | -      | - 12 | GRAVA | Bloques          | CONGLOMERADOS |
| 256      | -      | - 8  |       |                  |               |
| 64       | -      | - 6  |       | Cantos           |               |
| 4        | -      | - 2  |       |                  |               |
| 2        | -      | - 1  |       |                  | ARENISCAS     |
| 1        | -      | 0    | ARENA | Arena muy gruesa |               |
| 0.5      | 500    | 1    |       | Arena gruesa     |               |
| 0.25     | 250    | 2    |       | Arena media      |               |
| 0.125    | 125    | 3    |       | Arena fina       |               |
| 0.062    | 62     | 4    |       | Arena muy fina   |               |
| 0.031    | 31     | 5    |       |                  | LIMOLITAS     |
| 0.016    | 16     | 6    |       |                  |               |
| 0.008    | 8      | 7    | FANGO | Limo grueso      |               |
| 0.004    | 4      | 8    |       | Limo medio       |               |
|          |        |      |       | Limo fino        |               |
|          |        |      |       | Limo muy fino    | LUTITAS       |
|          |        |      |       | Arcilla          |               |
|          |        |      |       |                  | ARCILLITAS    |

**Figura 29 Clases de granulometría y correspondientes nombres de rocas detríticas (Bastida, 2005)**

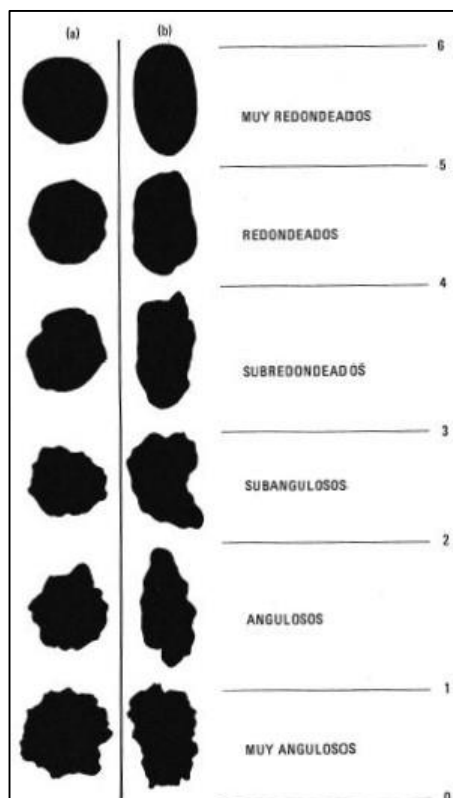
- Distribución de tamaños. El hecho de que una roca presente o no una gran dispersión de tamaño de grano es un reflejo de las condiciones de transporte y sedimentación; por lo que este dato tiene gran importancia sedimentológica. La forma de cuantificar la dispersión es mediante la desviación estándar (en unidades  $\phi$ ) tomada a 2/3 de la frecuencia máxima. Esta desviación se conoce en rocas sedimentarias con el término inglés de sorting. El sorting, simbolizado generalmente por la letra sigma puede ser conocido de forma aproximada utilizando los patrones de la figura (Figura 30).



**Figura 30 Patrones para determinar el sorting en rocas detríticas (principalmente rocas de tamaño de grano arena). (Basado en Pettijonh et al. 1973) (Dorado, 1989)**

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

- Morfología de los clastos. La forma de los granos o clastos también puede tener implicaciones sedimentológicas, por lo que es un dato importante en la descripción petrográfica de las rocas detríticas. El grado de redondez es el dato morfológico de mayor interés. Este se representa en cinco grados de mayor a menos, en los patrones de la Figura 31.



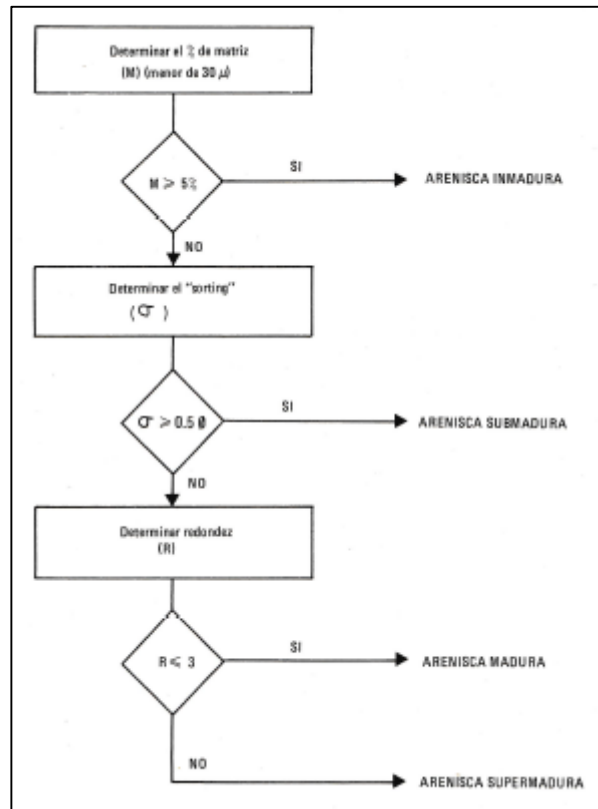
**Figura 31** Patrones para determinar el grado de redondez de los clastos.

(a) Forma de alta esfericidad

(b) Forma de baja esfericidad (Basado en Pettijohn)

(Dorado, 1989)

- Madurez textural. Se dice que una roca detrítica es más madura cuanto más largo y /o energético haya sido el proceso de transporte. Las rocas maduras se caracterizan por tanto, por tener los granos redondeados, por presentar una distribución homogénea de tamaños de grano y por la ausencia de matriz. En la Figura 32 se dan los pasos a seguir para calcular el grado de madurez textural en areniscas, en función del porcentaje de matriz, *sorting* y redondez de los clastos.



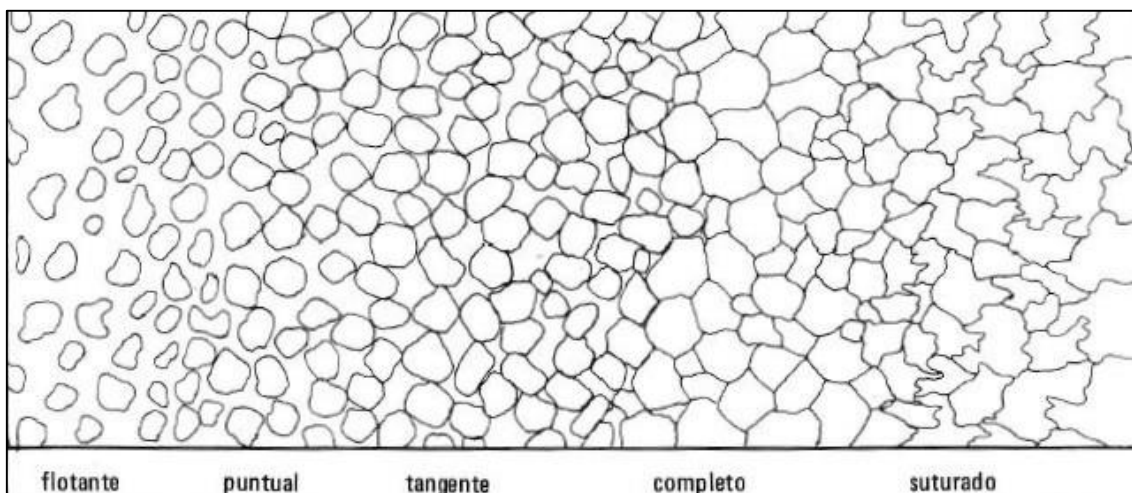
**Figura 32 Diagrama de flujo para determinar la madurez textural en areniscas. Basado en Folk (1951). Valores de sorting y redondez según lo establecido en apartados anteriores (Dorado, 1989)**

- **Empaquetamiento.** El espacio intergranular dejado por los clastos puede estar ocupado por material detrítico fino (matriz) o por cemento. Este espacio intergranular puede ser reducido duran la diagénesis, e incluso desaparecer, dado lugar a una textura en mosaico si tienen lugar procesos de disolución y recristalización. En general se distinguen cinco grados de empaquetamiento, desde el más bajo en que los granos están libres (flotantes), hasta el más alto en que los granos están saturados e interpenetrados. Los cinco grados se muestran en el patrón de la Figura 33. Una forma de medir el índice de empaquetamiento ( $I_e$ ) s contando el nmero de contactos grano-grano ( $N_c$ ) a lo largo de una recta hipotética de longitud  $l$ , aplicado la ecuación:

$$I_e = \frac{N_c}{l} \times D \quad D = \text{diametro medio de clastos}$$

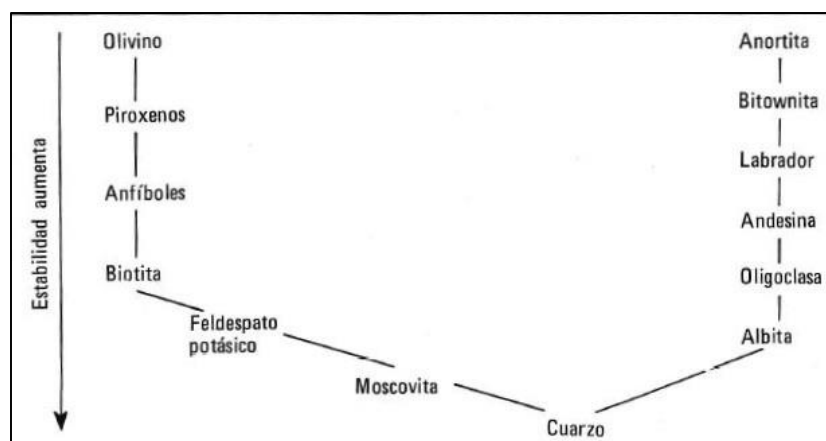


**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**



**Figura 33** Esquema representando los distintos grados de empaquetamiento y nomenclatura utilizada para cada uno (Dorado, 1989)

Los clastos detríticos se producen por disgregación de rocas cristalinas y/o sedimentarias preexistentes. Por tanto, puede ser cristales aislados, fragmentos de cristales y fragmento de roca sin disgregar. El cuarzo y los feldespatos están presentes en la mayor parte de las rocas ígneas y metamórficas, por lo que son los cristales más abundantes en rocas detríticas. Otro factor que determina la presencia de un mineral en rocas detríticas es la resistencia a la alteración durante el transporte. En la Figura 34 se ordenan los minerales más comunes, de las rocas ígneas y metamórficas, según la resistencia a la alteración. El cuarzo y los feldespatos alcalinos son los minerales más resistentes, lo que unido a su gran abundancia en rocas cristalinas, determina el que estos mineral (y principalmente el cuarzo) sean los principales formadores, como clastos, de las rocas detríticas. Los minerales ferromagnesianos se alteran con gran facilidad dando como resultado minerales arcillosos que constituyen otro componente esencial de las rocas detríticas, bien sea como matriz de areniscas, o bien formando rocas compuestas por materiales de tamaño arcilla. Además, cuando la roca cristalina que se altera de grano fino puede fragmentarse y dar lugar a clastos polimetálicos que se denominan fragmentos de roca. Los cuatro componentes, cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca y matriz arcillosa, forman esencialmente la práctica totalidad de las rocas detríticas y son utilizados como base de la clasificación en rocas de tamaño arena.



**Figura 34** Secuencia de los minerales más comunes en las rocas cristalinas, ordenados según el grado de alteración química (Según Blatt, 1982) (Dorado, 1989)

## 3.5 ARENISCAS EN CANTABRIA

### 3.5.1 Introducción

Las formaciones de areniscas en Cantabria están fundamentalmente en el triásico y cretácico en diferentes episodios sobre todo existen areniscas en el Berrasiense, Valanginiense, Albiense, Ecenomanese Superior.

En el triásico de los Sectores N. y E. se formaron areniscas, conglomerados y lutitas en el Pérmico y Bundsandstein. En el cretácico se formaron lutitas rojas, margas, areniscas, conglomerados y calizas arenosas (Grupo Cabuérniga) en el Berriasiense; lutitas rojas, areniscas y conglomerados, lutitas negras y areniscas en el sector NE (Grupo Pas) en el Valanginiense; Calizas arenosas, areniscas con ostreidos y ortobiolinas, y calizas con Toucasia en el Hautermense; areniscas, calizas y conglomerados (Fm. Lunada) en el Albiense inferior; areniscas, lutitas y margas en el Albiense Inferior, Medio y Superior; calizas bioclásticas, calizas nodulosas, areniscas y margas (Fm. Barcenaciones) en el Albiense Medio y Superior; areniscas y lutitas negras, intercalaciones de calizas arenosas (Fm. Valmaseda) en el Cenom. Inferior; areniscas de grano fino, limos y arcillas. Calcarenitas (Fm. Bielba) en el Cenom. Inferior; calcarenitas, calizas arenosas y areniscas calcáreas (Fm. Cabo de Lata) en el Maastric.

También hay pequeñas formaciones en el Terciario, arenas conglomeráticas. Intercalaciones de areniscas calcáreas (Fm. Hortigal) en el Eoceno Inferior Cuisiense; margas, areniscas, calizas y brechas calcáreas en el Eoceno Superior Priaboniense y en el Oligoceno.

En el cretácico en el Sector S (Ebro y valle del Besaya) existen formaciones en el cretácico inferior en el Albiense y Aptiense, areniscas, lutitas rojas y conglomerados. Intercalaciones de calizas y margas arenosas y en el Cretacico Superior Cenom. existen formaciones de calizas bioclásticas, arcillas negras, margas y areniscas (Fm. Arenas y Calizas de Dosante).

### 3.5.2 Estratigrafía

Las muestras que se han utilizado para este estudio proceden de explotaciones de arenisca en Cantabria. Estas explotaciones se encuentran ubicadas en dos formaciones geológicas distintas: por una parte las areniscas del Triásico en facies Buntsandstein y, por otra, las areniscas del Cretácico en facies Weald.

#### 3.5.2.1 Areniscas del triásico: Buntsandstein

Los sedimentos Trifásicos han sido estudiados por la mayor parte de los autores que han ocupado de Cantabria. Se destacan los trabajos de Mengaud (1920), Karrenberg (1934) y Ciry (1940), en los que se dedican varias páginas a describir algunas series estratigráficas, especialmente de los alrededores de Reinosa.

En la bibliografía regional se incluye en algunas zonas el Pérmico dentro de esta unidad. Sin embargo, la naturaleza de los sedimentos de esta edad en otras zonas próximas de la Cuenca Cantábrica (Hojas de Tudanca y Cabezón de la Sal), en donde se trata de limolitas violáceas, areniscas y rocas volcánicas muy distintas a las series aflorante en la Hoja, lleva a pensar que, en la zona, se trata de materiales atribuibles exclusivamente a las facies Buntsandstein.

*“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”*

---

Por otra parte, la ausencia de facies carbonatadas del Muschelkalk obliga a incluir parte del mismo en las notaciones de las facies Buntsandstein y Keuper.

Las pequeñas variaciones litológicas, así como los cambios de espesor que se observan entre las facies Buntsandstein, aflorantes en la Franja de Cabuérniga y Franja del Besaya, son debidos a causas paleogeográficas.

Las facies Keuper se presentan como arcillas abigarradas y yesos o como rocas subvolcánicas de textura ofilítica.

- **FACIES BUNTSANDSTEIN**

Ha sido estudiada en las columnas de Caldas y Villayuso.

En la Franja cabalgante del Besaya, está formando un conjunto de depósitos azoicos de colores generalmente rojizos, integrados por una potente serie de areniscas cuarcíticas a veces microconglomeráticas, generalmente de carácter lenticular, que alternan con arcillas hojosas o apizarradas y algunos niveles conglomeráticos, alcanzando un espesor medio de unos 500 metros. Esta potente serie detrítico-terrágena carece de fósiles. Las areniscas son generalmente rojas, arcillosas y con cemento de siderita más o menos limonitizada, predominando el cuarzo, abundantes feldespatos potásicos (20-30 por 100), moscovita, biotita alterada y minerales pesados (circón, turmalina y rutilo). Estos potentes tramos de arenisca, que son generalmente de grano medio a grueso y frecuentemente microconglomeráticas, presentan estratificación cruzada. Se desarrolla una silicificación por efecto de procesos de presión-solución entre los granos de cuarzo y también por la presencia de cemento silíceo en forma de crecimientos secundarios. Las intercalaciones de arcillas son hojosas y no han dado microfauna alguna.

En la parte septentrional de la Hoja (Franja cabalgante del Escudo de Cabuérniga), está representado el Buntsandstein (Corte de Caldas), por un potente tramo, de unos 400 metros de espesor. Son areniscas rojizas a blanquecinas, de grano medio a fino, desde friables a bien cementadas, en capas no mayores de un metro, algo lenticulares, con estratificación cruzada con niveles de areniscas conglomeráticas y conglomerados. Estas areniscas están constituidas por granos de cuarzo, feldespato potásico abundante y cemento de óxidos de hierro, en ocasiones siderita. Hacia arriba las areniscas contienen fragmentos de rocas cuarcíticas y micáceas. Moscovita, rara biotita, circón y turmalina son accesorios constantes. En el tercio superior de la serie, aproximadamente, hay niveles de areniscas con cemento calcáreo, e incluso con fragmentos de rocas calizas ferruginizadas, que pueden corresponder a un cambio lateral de las facies calcáreas del Muschelkalk.

En la franja del Escudo de Cabuérniga, el Buntsandstein va haciéndose más arenoso y más potente a medida que se va hacia el Este y los cortes descritos aquí presenta una serie litológica más típica que la descrita en el sector más occidental de la Franja (Hoja de Cabezón de la Sal).

Los materiales del Buntsandstein se apoyan en discordancia sobre distintos términos del Namuriense-Westfaliense. A, y sobre ellos, descansan, cuando existen, las arcillas rojo-vinosas del Keuper.

### **3.5.2.2 Areniscas del cretácico inferior: Facies Weald**

Gonzalez linares (1876) dio a conocer el descubrimiento de unas faunas de agua dulce con Unios y Paludinas en las dos vertientes del Escudo de Cabuérniga. La fauna se encontró en una serie arenoso-arcillosa considerada anteriormente como Jurásico (Maestre, 1864) y como

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Triásico (Gascue, 1874-75). Calderon (1875), confirma los resultados del primer autor mencionado, el cual en 1878 da a conocer un nuevo afloramiento en el valle del río Besaya.

Mengaud (1920), Ciry (1940), Rat (1959, 1961 Y 1962) y posteriormente Ramirez Del Pozo (1969) Y Ramirez Del Pozo y Aguilar (1972) han aportado nuevos datos para el conocimiento e interpretación de estos materiales.

Siguiendo las ideas, CIRY (1940) y RAMIREZ DEL POZO (1969) pueden separarse dos grupos de facies denominadas Purbeck y Weald, respectivamente, cuya distinción no siempre es sencilla. En la localidad de Los Llares la línea de separación de ambas facies es una superficie de discordancia angular.

• **VALANGINIENSE SUPERIOR-BARREMIENSE EN FACIES WEALD**

Los sedimentos de facies Weald afloran extensamente en la Hoja de Los Corrales de Buelna en las partes centro meridional (dominio en Entrante de Cabuérniga, Zona tectonizada del Toranzo y Puerto del Escudo y norte del Entrante mesoterciario costero). Yacen en paraconformidad sobre los materiales de facies Purbeck o en discordancia erosiva sobre los términos más antiguos hasta el Lías calizo (Entrante de Cabuérniga, Hoja de Cabezón de la Sal) y Lías o Keuper (Entrante mesoterciario costero). En ambos dominios los materiales de facies Weald presentan características litológicas distintas.

En el Entrante de Cabuérniga la Franja tectonizada del Toranzo y Puerto del Escudo, comprenden una serie de areniscas arcillas y niveles microconglomeráticos. Un estudio actualmente en curso (Pujalte), tiende a la distinción de varias formaciones sucesivas, tal como se ha efectuado en el Puerto de las Estacas (Pujalte, 1974), en atención al porcentaje de areniscas, de figuras sedimentarias, etc..., observables en la serie. En el Weald de esta zona de la Hoja, dominan las areniscas a muro y techo de la unidad. En la parte central de la misma aparece una alternancia de limolitas y areniscas rojo-violáceas con intercalaciones carbonosas, predominando los tonos rojos en su mitad superior y los grises y amarillentos en la inferior.

En síntesis, el Weald del Entrante de Cabuérniga, de muro a techo se compone de: areniscas de grano grueso, generalmente microconglomeráticas en la base, masivas, lenticulares, que forman generalmente crestones. Sobre ellas reposa un tramo de arcillas hojosas casi siempre negruzcas y paquetes de areniscas más o menos calcáreas, con intercalaciones lumaquelíticas formadas por Unios y Paludinas. A continuación viene un conjunto definido por una alternancia de areniscas de grano fino a medio, limolitas y lutitas azoicas, éstas con carácter masivo, sin laminación o estratificación aparente, con restos vegetales carbonizados. Se han reconocido también raíces fósiles, que indican periodos de exposición subaérea.

El paquete de areniscas basales, que forman más del 60 por 100 del tramo, están constituidas casi exclusivamente por granos de cuarzo.

Las estructuras más frecuentes de las areniscas son superficies de estriague y estratificaciones cruzadas. En menor abundancia se encuentran laminaciones cruzadas y ripplemarks.

Hay dos tipos de superficie: unos irregulares, esencialmente planas, desarrollándose en la base de los paquetes de areniscas separando generalmente litologías diferentes, y otras, curvas y cóncavas hacia arriba, de extensión lateral limitada, desarrollándose siempre entre areniscas.

En el Entrante de Cabuérniga el techo está erosionado, no llegándose nunca al Aptiense. En cambio, en la Zona tectonizada del Toranzo y Puerto del Escudo, localmente hay depósitos

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

del Aptiense dispuestos encima de los materiales de facies Weald. El espesor máximo aflorante es superior a los 1.000 metros.

Los afloramientos del Weald en la parte nororiental de la Hoja correspondientes al Entrante mesoterciario costero son de litología distinta a los anteriormente descritos. Se representan en el Corte de Caldas, donde tienen una potencia aproximada a 640 metros. Corresponden a limos, arcillas limolíticas y algunas capas de areniscas. El espesor de esta serie disminuye de Este a Oeste por efecto del levantamiento del umbral del Escudo de Cabuérniga, terminando por desaparecer al sur del sinclinal de Bielba (Hoja de Cabezón de la Sal).

### **3.5.3 Características petrográficas de las muestras estudiadas**

Para este estudio se han seleccionado cuatro muestras del Buntsandstein y dos del Weald, con las siguientes características petrográficas:

- **Areniscas del Buntsandstein:**
  - a) CA-3E → es una arenisca de grano medio-grueso, de color amarillento, compacta. (Figura 35)



**Figura 35. Muestra de arenisca CA-3E**

- b) CA-2D → Arenisca de grano fino, color blanco, muy cementada, dura y compacta. (Figura 36)



**Figura 36 Muestra de arenisca CA-2D**

- c) CA-1F → Arenisca de grano fino-medio, presenta laminación, de intenso color rojo debido a la existencia de cemento ferruginoso, presencia de mica (moscovita), muy dura, compacta y bien cementada. (Figura 37)





**Figura 37 Muestra de arenisca CA-1F**

- d) B-1F → Arenisca roja de grano grueso con porosidad visible.(Figura 38)



**Figura 38 Muestra de arenisca B-1F**

- **Areniscas de la facies Weald:**

- a) SP-2E → Arenisca de grano fino-medio, de color gris-pardo. Esta arenisca presenta una concentración de hierro en vetas gruesas.(Figura 39)



**Figura 39 Muestra de arenisca SP-2E**

- b) SP-1E → Arenisca de grano fino-medio, de color amarillo, micácea con moteado de limonita.(Figura 40)



**Figura 40 Muestra de arenisca SP-1E**

# CAPÍTULO 4:

# METODOLOGÍA



## 4 METODOLOGIA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La conductividad térmica es una propiedad física muy importante en las rocas ornamentales, para saber la capacidad de aislamiento y acondicionamiento térmico de edificios.

Los valores de la conductividad térmica se obtienen por métodos experimentales y existe una amplia dispersión de características físicas entre materiales semejantes. Incluso para el mismo material se pueden medir diferentes conductividades en función de su humedad, de la temperatura del ensayo y de la dirección del flujo de calor, por lo que los valores genéricos de conductividad de un material se suelen referir a materiales secos a 20°C.

Para medir la conductividad térmica se suele utilizar el Método de la Placa Caliente, que es un método experimental para obtener la conductividad de las rocas y se construye siguiendo la normativa UNE.

Para la realización de este ensayo el método utilizado para obtener la conductividad, se ha basado en el Método de la Placa Caliente, pero adaptado a los recursos disponibles en el Laboratorio de Energías Renovables. Es un ensayo experimental y al no tener equipos adecuados es muy limitado.

### 4.2 DESARROLLO DEL ENSAYO

#### 4.2.1 Descripción del material utilizado

a) *Balanza con precisión  $\pm 0.01$  gramos*, (Figura 41) mide la masa de un cuerpo o sustancia química, utilizando como medio de comparación la fuerza de la gravedad que actúa sobre el cuerpo. La balanza electrónica consta de tres elementos básicos:

- El objeto a ser pesado que se coloca sobre el platillo de pesaje ejerce una presión que está distribuida de forma aleatoria sobre la superficie del platillo. De allí, mediante un mecanismo de transferencia – palancas, apoyos, guías –, se concentra la carga del peso en una fuerza simple [F] que puede ser medida.
- Un transductor de medida, conocido con el nombre de celda de carga, produce una señal de salida proporcional a la fuerza de carga, en forma de cambios en el voltaje o de frecuencia.<sup>4</sup>
- Un circuito electrónico análogo digital que finalmente presenta el resultado del pesaje en forma digital.

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**



**Figura 41** Balanza con precisión  $\pm 0.01$  gramos

El sistema de procesamiento de la señal está compuesto por el circuito que transforma la señal eléctrica, emitida por el transductor de medida en datos numéricos que pueden ser leídos en una pantalla. El proceso de la señal comprende las siguientes funciones:

- Tara. Se utiliza para colocar en cero el valor de la lectura, con cualquier carga dentro del rango de capacidad de la balanza. Se controla con un botón ubicado generalmente en el frente de la balanza.
  - Control para ajuste del tiempo de integración. Los valores de peso son promediados durante un período predefinido de tiempo. Dicha función es muy útil cuando se requiere efectuar operaciones de pesaje en condiciones inestables. Por ejemplo: presencia de corrientes de aire o vibraciones.
  - Redondeo del resultado. En general las balanzas electrónicas procesan datos internamente de mayor resolución que aquellos que se presentan en la pantalla. De esta forma se logra centrar exactamente la balanza en el punto cero, cuando la balanza es tarada. El valor interno neto se redondea en la pantalla.
  - Detector de estabilidad. Se utiliza en operaciones de pesaje secuencial y permite comparar los resultados entre sí. Cuando el resultado se mantiene, es liberado y puesto en pantalla, aspecto que se detecta al encenderse el símbolo de la unidad de peso seleccionada.
  - El procesamiento electrónico de las señales permite disponer de otras funciones tales como conteo de partes, valor porcentual, valor objetivo, entre otras. Dichos cálculos son realizados por el microprocesador, de acuerdo con las instrucciones que el operador ingresa a través del teclado de la balanza
- b) *Estufa de laboratorio-1450 Watt.* (Figura 42.) Sirve para deshidratar reactivos de laboratorio o secar instrumentos. Las características generales se muestran en la tabla siguiente (Figura 43.):

| Datos técnicos generales |                        |
|--------------------------|------------------------|
| Función de la estufa     | Secado de las muestras |
| Rango de temperatura     | 20-250°C               |
| Estantes                 | 2                      |
| Unidades de temperatura  | Centígrados            |
| Grado de fuga            | 0,01 bar/h             |

**Figura 42** Tabla de características de la estufa de laboratorio



**Figura 43** Estufa de laboratorio-1450W

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

- c) *Alimentador laboratorio. MANSION EP-613.* (Figura 45) El alimentador permite una regulación precisa de la tensión y de la corriente de salida en la fuente de alimentación fijándose en las pequeñas subidas y bajadas. Las características del alimentador de laboratorio se muestran en la siguiente tabla (Figura 44):

| Datos técnicos generales       |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Tipo de alimentador            | de laboratorio           |
| Tensión de salida              | 0-30V CC                 |
| Intensidad de salida           | 0-2,5A                   |
| Salida de tensión              | 12V DC/0,5 A, 5V DC/0,5A |
| Fuente de alimentación         | 230VCA 50/60Hz           |
| Tipo de fuente de alimentación | lineal                   |

**Figura 44 Tabla de características generales del alimentador de laboratorio MANSION EP-613**



**Figura 45 Alimentador de laboratorio MANSION EP-613**

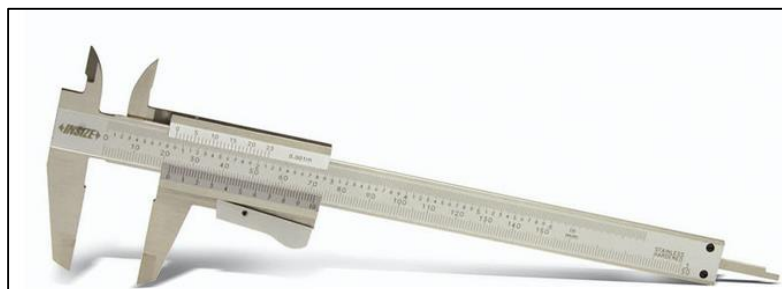
I

- d) *Calibre analógico pulsador Insize 1223* (Figura 47). Herramienta de medición precisa para tomar medidas de espesores, diámetros, orificios. Las características generales del calibre analógico se muestran en la siguiente tabla (Figura 46):

| Datos técnicos generales |                        |
|--------------------------|------------------------|
| Precisión                | $\pm 0,05\text{mm}$    |
| Resolución               | $0,05\text{mm}/1/28''$ |
| Rango                    | 0-150mm                |
| Fabricado según Din 862  |                        |
| Con pulsador de apriete  |                        |

**Figura 46 Tabla de características generales del calibre analógico pulsador Insize 1223**

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***



**Figura 47 Calibre analógico pulsador Inzize 1223**

- e) *Hilo conductor Nicrom 0.4mm.* El hilo conductor tiene una resistencia 8 Ohmios/metro (Figura 48Figura 48)



**Figura 48 Hilo conductor Nicrom 0.4mm**

- f) *Aislante*  
g) *Cable de seguridad-banana cocodrilo (Figura 49)*



**Figura 49 Cable de seguridad-banana-cocodrilo**

- h) *Sonda superficial TP tipo K.* (Figura 51) La sonda que se ha utilizado para medir la temperatura de contacto de las superficies a estudio se trata de una sonda superficial TP tipo K de muy rápida reacción, banda termopar flexible, se puede usar tanto en superficies plana como curvas, tiene un rango de medición hasta +300°C, y consta de un cable fijo extendido. Las características generales de la sonda superficial se muestran en la siguiente tabla (Figura 50):

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

| Datos técnicos generales            |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| Función de la sonda                 | Temperatura          |
| Rango de medición                   | -60 °C hasta +300 °C |
| Exactitud Clase 2*                  | Clase 2*             |
| Tiempo de respuesta                 | (t99) 3 seg          |
| Longitud del cable                  | 1,2 m                |
| Diámetro punta del tubo de la sonda | 12mm                 |
| Diámetro tubo de la sonda           | 5mm                  |
| Longitud del tubo de la sonda       | 115mm                |
| Modelo                              | 0602 0393            |

**Figura 50** *Tabla de características generales de la sonda superficial TP tipo K*

\*Según la normativa EN 60584-2, la exactitud de la Clase 2 se aplica de -40 hasta +1200 °C.



**Figura 51** *Sonda superficial TP tipo K*

- i) *Muestras de areniscas.* Para realizar el estudio se han utilizado 6 muestras de arenisca, de las mismas medidas (aproximadamente 12 x 6 cm), y diferentes edades petrológicas y composición química

## **4.2.2 Procedimiento**

Para comenzar se ha practicado el ensayo con placas de arenisca de 20 x 20 centímetros y ha consistido en ponerlas encima de una placa calefactora, rodeadas de aislante a una cierta potencia e intensidad constantes, midiendo la temperatura de la muestra de arenisca cada cierto periodos de tiempo. El problema es que con la placa calefactora a la mínima potencia, la muestra de arenisca alcanza una temperatura muy elevada en muy poco tiempo, por lo que el ensayo no es práctico para medir la temperatura de la muestra de arenisca en periodos de tiempo.

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

Después se ha practicado el ensayo con las mismas placas de arenisca de 20 x 20 centímetros, pero poniéndolas encima de una manta eléctrica, que tiene menos potencia, intentado observar los distintos cambios de temperatura a lo largo de un periodo de tiempo. El problema es que la manta no alcanza suficiente potencia para dar calor a las muestras de arenisca, por lo que midiendo la temperatura antes de poner la muestra encima de manta eléctrica y después apenas varía.

El ensayo que se aplica realmente para el estudio de la conductividad térmica de las muestras de arenisca con diferentes características geológicas, cabe destacar que está limitado por el material disponible y por las condiciones del laboratorio.

Para la realización de este ensayo, en primer lugar, las muestras de arenisca se introducen en la estufa de laboratorio, para el secado de las muestras de arenisca. El secado de las muestras de arenisca se efectúa según la norma UNE-EN ISO 17892-1:2015 “Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 1: Determinación de la humedad. (ISO 17892-1:2014).”, en la que la estufa tiene que estar a 115°C, un tiempo de dieciocho horas para que la masa del cuerpo sea constante. Las muestras de arenisca se pesan antes y después de ser introducidas en la estufa, y se muestran en la siguiente tabla (Figura 52):

| Nombres de las muestras | Peso húmedo (gramos) | Peso seco (gramos) |
|-------------------------|----------------------|--------------------|
| CA-2D                   | 170,17               | 169,86             |
| CA-3E                   | 167,77               | 167,49             |
| SP-2E                   | 158,42               | 157,99             |
| B-1E                    | 174,76               | 174,47             |
| SP-1F                   | 141,13               | 140,98             |
| CA-1E                   | 193,43               | 193,09             |

**Figura 52 Tabla de pesos de las muestras antes y después de ser introducidas en la estufa**

Esto se hace debido a que las muestras de arenisca al estar a temperatura ambiente contienen humedad y puede influir a la hora de tomar la temperatura de las muestras.

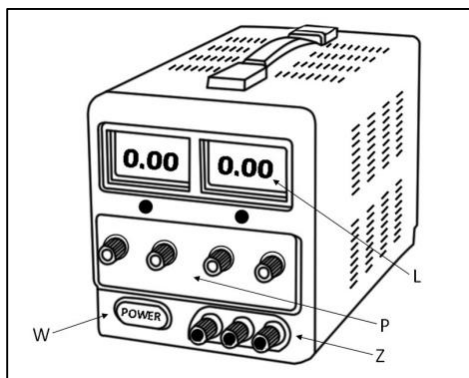
Una vez secadas las muestras, se toman sus medidas con el calibre (Figura 53):

| Nombre de las muestras | Largo (mm) | Ancho (mm) | Espesor (mm) |
|------------------------|------------|------------|--------------|
| CA-2D                  | 0,120      | 0,061      | 0,010        |
| CA-3E                  | 0,120      | 0,071      | 0,009        |
| SP-2E                  | 0,121      | 0,061      | 0,009        |
| B-1E                   | 0,122      | 0,061      | 0,010        |
| SP-1F                  | 0,123      | 0,060      | 0,009        |
| CA-1E                  | 0,121      | 0,059      | 0,012        |

**Figura 53 Tabla de medidas de las muestras de arenisca**

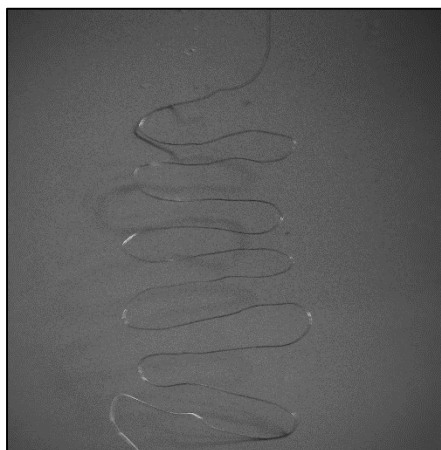
***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

Se construye un circuito conectando a los bornes de salida del alimentador de laboratorio, Z, (Figura 54), unos cables de seguridad a los que va conectado el hilo conductor.



**Figura 54.**  
**Esquema del alimentador de laboratorio. Siendo W, el interruptor de alimentación; Z, los bornes de salida; P, Potenciómetros de la regulación basto y fino de la tensión y limitación de corriente; L, pantalla LCD de la corriente y tensión**

Al hilo conductor, se le deforma, haciéndole la forma que aparece en la Figura 55 para que el calor se transmita a todas las partes posibles de la muestra de arenisca, que no se concentre en un solo punto, y así estudiar su comportamiento



**Figura 55 Forma aplicada al hilo conductor**

Una vez realizada la forma del hilo conductor, éste se rodea de aislante (Figura 56.) para que el calor se transmita solamente a la muestra, y no tenga pérdidas. Se conecta a cada extremo del hilo, un cable de seguridad, y este está conectado al alimentador del laboratorio, para que le dé corriente y se pueda comenzar el experimento.





*Figura 56 Hilo conductor rodeado de aislante.*

El alimentador de laboratorio se enciende, con todo ello conectado, y se regulan los potenciómetros de regulación de tensión y limitación de la corriente a los parámetros que se requieran. En este caso, se regula la tensión a 7 voltios y a 1 amperímetro (Figura 57.).



*Figura 57 Alimentador de corriente con las condiciones aplicadas al ensayo*

Las muestras se colocan, en el hilo conductor rodeado de aislante (Figura 58), y se mide la temperatura que alcanza la muestra, tanto la que está en contacto con el hilo conductor, como la que está al aire libre. Estas temperaturas se miden con el Sonda superficial TP tipo K. Las temperaturas se miden cada cinco minutos, hasta que la temperatura de la muestra sea constante.



*Figura 58 Muestra de arenisca CA-1F, encima del hilo conductor, realizándose el ensayo*

### 4.2.3 Datos recogidos en el laboratorio

Nombre de la muestra: **CA-2D**

TEMPERATURA AMBIENTE: 20,6 °C

| Tiempo | Intensidad | Voltaje | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 1          | 7       | 23,2                  | 23,3                  |
| 5      | 1          | 7       | 34,7                  | 34,1                  |
| 10     | 1          | 7       | 42,8                  | 42,1                  |
| 15     | 1          | 7       | 48,0                  | 42,0                  |
| 20     | 1          | 7       | 50,6                  | 49,6                  |
| 25     | 1          | 7       | 53,3                  | 53,0                  |
| 30     | 1          | 7       | 55,7                  | 54,1                  |
| 35     | 1          | 7       | 56,1                  | 55,5                  |
| 40     | 1          | 7       | 56,7                  | 56,0                  |
| 45     | 1          | 7       | 55,9                  | 56,1                  |
| 50     | 1          | 7       | 57,3                  | 62,6                  |

*Figura 59 Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-2D*

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Nombre de la muestra: **CA-3E**

TEMPERATURA AMBIENTE: 20,3°C

| Tiempo | Intensidad | Voltaje | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 1          | 7       | 20,2                  | 20,3                  |
| 5      | 1          | 7       | 32,6                  | 32,5                  |
| 10     | 1          | 7       | 39,8                  | 38,6                  |
| 15     | 1          | 7       | 41,2                  | 40,6                  |
| 20     | 1          | 7       | 44,0                  | 44,7                  |
| 25     | 1          | 7       | 48,3                  | 47,7                  |
| 30     | 1          | 7       | 47,6                  | 48,6                  |

**Figura 60** *Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-3E*

Nombre de la muestra: **SP-2E**

TEMPERATURA AMBIENTE: 20,6°C

| Tiempo | Intensidad | Voltaje | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 1          | 7       | 27,4                  | 27,3                  |
| 5      | 1          | 7       | 38,0                  | 36,7                  |
| 10     | 1          | 7       | 44,1                  | 41,7                  |
| 15     | 1          | 7       | 48,5                  | 46,6                  |
| 20     | 1          | 7       | 51,0                  | 50,5                  |
| 25     | 1          | 7       | 53,6                  | 52,3                  |
| 30     | 1          | 7       | 54,2                  | 53,1                  |
| 35     | 1          | 7       | 56,1                  | 54,8                  |
| 40     | 1          | 7       | 54,3                  | 52,1                  |
| 45     | 1          | 7       | 55,2                  | 53,4                  |
| 50     | 1          | 7       | 55,3                  | 55,6                  |

**Figura 61** *Tabla de datos obtenidos de la muestra SP-2E*

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Nombre de la muestra: **B-1E**

TEMPERATURA AMBIENTE: 20,6°C

| Tiempo | Intensidad | Voltaje | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 1          | 7       | 24,6                  | 24,9                  |
| 5      | 1          | 7       | 35,5                  | 35,1                  |
| 10     | 1          | 7       | 42,9                  | 42,2                  |
| 15     | 1          | 7       | 46,8                  | 46,2                  |
| 20     | 1          | 7       | 51,2                  | 49,8                  |
| 25     | 1          | 7       | 53,0                  | 52,1                  |
| 30     | 1          | 7       | 55,4                  | 54,8                  |
| 35     | 1          | 7       | 55,2                  | 53,6                  |
| 40     | 1          | 7       | 56,8                  | 56,2                  |
| 45     | 1          | 7       | 56,0                  | 56,9                  |

**Figura 62** Tabla de datos obtenidos de la muestra **B-1E**

Nombre de la muestra: **SP-1F**

TEMPERATURA AMBIENTE: 20,6°C

| Tiempo | Intensidad | Voltaje | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 1          | 7       | 21,1                  | 20,9                  |
| 5      | 1          | 7       | 34,3                  | 33,2                  |
| 10     | 1          | 7       | 42,8                  | 41,7                  |
| 15     | 1          | 7       | 45,6                  | 45,5                  |
| 20     | 1          | 7       | 50,5                  | 48,7                  |
| 25     | 1          | 7       | 52,7                  | 49,8                  |
| 30     | 1          | 7       | 53,7                  | 51,5                  |
| 35     | 1          | 7       | 55,7                  | 53,7                  |
| 40     | 1          | 7       | 55,9                  | 54,2                  |
| 45     | 1          | 7       | 56,2                  | 51,1                  |
| 50     | 1          | 7       | 56,5                  | 51,0                  |
| 55     | 1          | 7       | 54,1                  | 54,5                  |
| 60     | 1          | 7       | 56,4                  | 55,1                  |
| 65     | 1          | 7       | 56,3                  | 54,4                  |

**Figura 63** Tabla de datos obtenidos de la muestra **SP-1F**

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Nombre de la muestra: **CA-1E**

TEMPERATURA AMBIENTE: 20,61°C

| Tiempo | Intensidad | Voltaje | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 1          | 7       | 20,2                  | 20,2                  |
| 5      | 1          | 7       | 32,1                  | 31,1                  |
| 10     | 1          | 7       | 39,3                  | 38,1                  |
| 15     | 1          | 7       | 42,7                  | 40,0                  |
| 20     | 1          | 7       | 47,6                  | 47,0                  |
| 25     | 1          | 7       | 50,7                  | 47,2                  |
| 30     | 1          | 7       | 52,8                  | 50,9                  |
| 35     | 1          | 7       | 52,8                  | 51,7                  |
| 40     | 1          | 7       | 52,1                  | 51,3                  |
| 45     | 1          | 7       | 54,5                  | 52,0                  |
| 50     | 1          | 7       | 55,7                  | 53,0                  |
| 55     | 1          | 7       | 56,6                  | 54,2                  |
| 60     | 1          | 7       | 58,8                  | 55,4                  |
| 65     | 1          | 7       | 55,9                  | 54,2                  |
| 70     | 1          | 7       | 55,4                  | 52,0                  |

**Figura 64** Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-1E

# CAPÍTULO 5: RESULTADOS

## 5 RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCION

El objetivo de este ensayo es calcular la conductividad térmica media de cada una de las muestras con los datos obtenidos, basándose en la siguiente fórmula (Ecuación 27):

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{k \cdot A}{x} (T_1 - T_2) \quad \text{Ecuación 27}$$

Siendo k, la conductividad térmica; A, el área de la superficie de contacto;  $(T_1 - T_2)$ , es la diferencia entre el foco caliente y el foco frío; x, es el espesor del material;  $Q/\Delta t$ , es el calor transmitido por unidad de tiempo.

El tramo del hilo conductor es la más resistiva, teniendo en cuenta su longitud, diámetro y resistividad de 0.8  $\Omega$ /metro, por lo que se supone que los otros tramos que van con cable de seguridad banana cocodrilo no tienen pérdidas y que se va a centrar la potencia en ese tramo debido a la siguiente ecuación (Ecuación 28).

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad \text{Ecuación 28}$$

Siendo R, la resistencia del conductor;  $\rho$ , resistividad del material; l, longitud del conductor; s, sección del conductor.

Suponiendo en este ensayo, que toda la potencia de este circuito va dedicada a producir calor, se calcula el calor utilizando la fórmula de la potencia (Ecuación 29). Esto es debido al efecto Joule, que dice, que por el hilo conductor circula corriente eléctrica y parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo.

$$P = V \cdot I \quad \text{Ecuación 29}$$

Siendo V, el voltaje del circuito; I, la intensidad del circuito

Teniendo en cuenta que la tensión utilizada en el circuito es de 7 voltios, y la corriente es de 1 amperímetro. El calor producido es el siguiente:

$$P = 7 \cdot 1 = 7 \text{ Watios}$$

Además también se han obtenido datos de porosidad y de densidad de cada muestra para luego poder llegar a una conclusión de todos los datos y poder compararlos.



## 5.2 DATOS OBTENIDOS

- a) **La muestra CA-2D**, es una arenisca blanca de grano fino cuarzosa y compacta, por lo que presenta baja porosidad (Figura 65).



**Figura 65 Muestra de arenisca CA-2D**

En la muestra CA-2D, se obtienen datos de temperatura hasta los cincuenta minutos debido a que después de ese tiempo las medidas de temperatura de ésta muestra son constantes dentro de un intervalo (Figura 66.).

| Tiempo | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 23,2                  | 23,3                  |
| 5      | 34,7                  | 34,1                  |
| 10     | 42,8                  | 42,1                  |
| 15     | 48,0                  | 42,0                  |
| 20     | 50,6                  | 49,6                  |
| 25     | 53,3                  | 53,0                  |
| 30     | 55,7                  | 54,1                  |
| 35     | 56,1                  | 55,5                  |
| 40     | 56,7                  | 56,0                  |
| 45     | 55,9                  | 56,1                  |
| 50     | 57,3                  | 62,6                  |

**Figura 66 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra CA-2D**

A la hora de medir la temperatura tanto interior como exterior de la arenisca, se observa que a partir de los cuarenta minutos, la temperatura interior disminuye, mientras que la exterior se mantiene constante.

Además de las medidas de temperatura, se ha obtenido la temperatura ambiente del laboratorio siendo 20.6°C, y los pesos antes y después de meter en la estufa, y también las medidas de la muestra (Figura 67.)

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

|                 |        |
|-----------------|--------|
| Peso húmedo (g) | 170,17 |
| Peso seco (g)   | 169,86 |
| Largo (mm)      | 0,120  |
| Ancho (mm)      | 0,061  |
| Espesor (mm)    | 0,010  |

**Figura 67** Tabla de medidas y pesos de la muestra CA-2D

La porosidad y densidad de esta muestra se observan en la siguiente tabla (Figura 68):

| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad |
|-------------------------------|-----------|
| 2329                          | 8,07      |

**Figura 68** Tabla de datos de porosidad y densidad de la muestra CA-2D

- b) **La muestra CA-3E** es una arenisca amarilla de grano grueso, abundante presencia de hidróxidos de hierro entre los granos, elevada porosidad y sin minerales aislantes (Figura 69.).



**Figura 69** Muestra de arenisca CA-3E

En esta muestra se obtienen datos hasta los treinta minutos, debido a que a partir de los veinticinco minutos desciende la temperatura tanto interior de la muestra como exterior (Figura 70)

| Tiempo | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 20,2                  | 20,3                  |
| 5      | 32,6                  | 32,5                  |
| 10     | 39,8                  | 38,6                  |
| 15     | 41,2                  | 40,6                  |
| 20     | 44,0                  | 44,7                  |
| 25     | 48,3                  | 47,7                  |
| 30     | 47,6                  | 48,6                  |

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

*Figura 70 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra CA-3E*

La temperatura ambiente del laboratorio en esta muestra era de 20,3°C, y las medidas y pesos antes y después de introducirlas en la estufa, aparecen en la tabla siguiente (Figura 71)

|                    |         |
|--------------------|---------|
| <b>Peso húmedo</b> | 167,770 |
| <b>Peso seco</b>   | 167,490 |
| <b>Largo</b>       | 0,120   |
| <b>Ancho</b>       | 0,071   |
| <b>Espesor</b>     | 0,009   |

*Figura 71 Tabla de Medidas y pesos de la muestra CA-3E*

La porosidad y densidad de la muestra CA-3E, se muestran en la siguiente tabla (Figura 74):

| Densidad (kg/m3) | Porosidad |
|------------------|-----------|
| 2048             | 20,1      |

*Figura 72 Tabla de datos de densidad y de porosidad de la muestra CA-3E*

- c) **La muestra SP-2E**, es una arenisca de grano fino-medio, con abundante mica moscovita diseminada por toda la roca. Además, presenta una veta de hierro (goethita) que constituye una anisotropía importante en el comportamiento de esta roca.(Figura 73)



*Figura 73 Muestra de arenisca SP-2E*

En esta muestra se han obtenido datos de temperatura hasta los cincuenta minutos. Se observa que en el minuto cuarenta la temperatura disminuye y luego hasta el cincuenta vuelve a aumentar, pero no es el valor máximo de temperatura de la muestra. El momento de máxima temperatura es en el minuto treinta y cinco. Las medidas de temperatura de esta muestra aparecen en la siguiente tabla (Figura 74)

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

| Tiempo | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 27,4                  | 27,3                  |
| 5      | 38,0                  | 36,7                  |
| 10     | 44,1                  | 41,7                  |
| 15     | 48,5                  | 46,6                  |
| 20     | 51,0                  | 50,5                  |
| 25     | 53,6                  | 52,3                  |
| 30     | 54,2                  | 53,1                  |
| 35     | 56,1                  | 54,8                  |
| 40     | 54,3                  | 52,1                  |
| 45     | 55,2                  | 53,4                  |
| 50     | 55,3                  | 55,6                  |

**Figura 74 Tabla de datos obtenidos en el ensayo de a muestra SP-2E**

La temperatura ambiente en este caso, son 20°C. Y las medidas y peso antes de y después de ser introducida en la estufa aparecen en la siguiente tabla (Figura 75):

|                    |         |
|--------------------|---------|
| <b>Peso húmedo</b> | 158,420 |
| <b>Peso seco</b>   | 157,990 |
| <b>Largo</b>       | 0,121   |
| <b>Ancho</b>       | 0,061   |
| <b>Espesor</b>     | 0,009   |

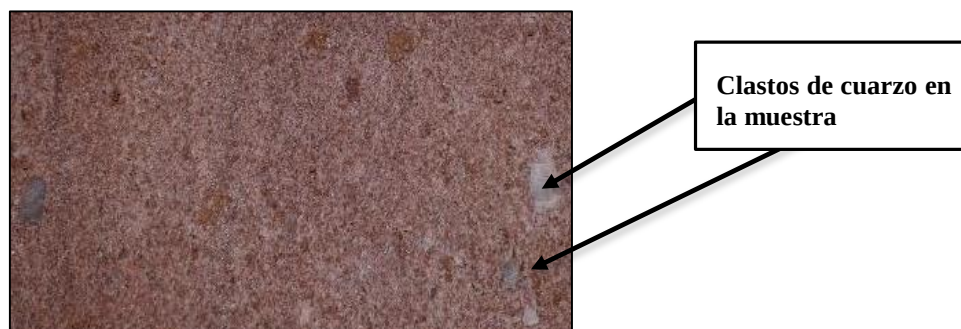
**Figura 75 Tabla de medidas y pesos de la muestra SP-2E**

La porosidad y densidad obtenida de la muestra son las siguientes (Figura 76)

|                                    |                  |
|------------------------------------|------------------|
| <b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Porosidad</b> |
| 2270                               | 13,86            |

**Figura 76 Tabla de densidad y porosidad de la muestra SP-2E**

- d) **La muestra B-1E**, es una arenisca roja de tamaño de grano medio-fino microconglomerática con clastos de cuarzo de tamaños superiores a 1mm. Presenta una elevada porosidad con un ligero bandeado (Figura 77).



**Figura 77 Muestra de arenisca B-1E**

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

La temperatura ambiente que había mientras se produce el ensayo era de 20°C. Se toman datos hasta los cuarenta y cinco minutos. Se observa que en el minuto cuarenta y cinco la temperatura interior disminuye, mientras que la exterior aumenta (Figura 78).

| Tiempo | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 24,6                  | 24,9                  |
| 5      | 35,5                  | 35,1                  |
| 10     | 42,9                  | 42,2                  |
| 15     | 46,8                  | 46,2                  |
| 20     | 51,2                  | 49,8                  |
| 25     | 53,0                  | 52,1                  |
| 30     | 55,4                  | 54,8                  |
| 35     | 55,2                  | 53,6                  |
| 40     | 56,8                  | 56,2                  |
| 45     | 56,0                  | 56,9                  |

**Figura 78 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra B-1E**

Las medidas y pesos antes y después de introducirse en la estufa de laboratorio son los siguientes (Figura 79):

|                    |        |
|--------------------|--------|
| <b>Peso húmedo</b> | 174,76 |
| <b>Peso seco</b>   | 174,47 |
| <b>Largo</b>       | 0,122  |
| <b>Ancho</b>       | 0,061  |
| <b>Espesor</b>     | 0,010  |

**Figura 79 Tabla de medidas y pesos de la muestra B-1E**

La porosidad y densidad de la muestra B-1E aparece en la siguiente tabla (Figura 80)

| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad |
|-------------------------------|-----------|
| 2190                          | 14,44     |

**Figura 80 Tabla de densidad y porosidad de la muestra B-1E**

- e) **La muestra SP-1F** es una arenisca ocre de grano fino-medio, muy porosa, cuarzosa, algo micácea, con restos de hidróxidos de hierro (Figura 81)



**Figura 81 Muestra de arenisca SP-1F**

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

La temperatura ambiente obtenida es 20.6°C. En esta muestra, se toman medidas de temperatura interior y exterior hasta los sesenta y cinco minutos, en ellos se observa, que la temperatura máxima obtenida tanto interior como exterior, está en el minuto sesenta, luego vuelve a decrecer (Figura 82).

| Tiempo | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 21,1                  | 20,9                  |
| 5      | 34,3                  | 33,2                  |
| 10     | 42,8                  | 41,7                  |
| 15     | 45,6                  | 45,5                  |
| 20     | 50,5                  | 48,7                  |
| 25     | 52,7                  | 49,8                  |
| 30     | 53,7                  | 51,5                  |
| 35     | 55,7                  | 53,7                  |
| 40     | 55,9                  | 54,2                  |
| 45     | 56,2                  | 51,1                  |
| 50     | 56,5                  | 51,0                  |
| 55     | 54,1                  | 54,5                  |
| 60     | 56,4                  | 55,1                  |
| 65     | 56,3                  | 54,4                  |

**Figura 82 Tabla de datos obtenidos del ensayo de la muestra SP-1F**

Las medidas de la muestra tomadas con el calibre y el peso de las muestras antes y después de introducirla en la estufa son las siguientes (Figura 83)

|                    |         |
|--------------------|---------|
| <b>Peso húmedo</b> | 141,130 |
| <b>Peso seco</b>   | 140,980 |
| <b>Largo</b>       | 0,123   |
| <b>Ancho</b>       | 0,060   |
| <b>Espesor</b>     | 0,009   |

**Figura 83 Tabla de pesos y medidas de la muestra SP-1F**

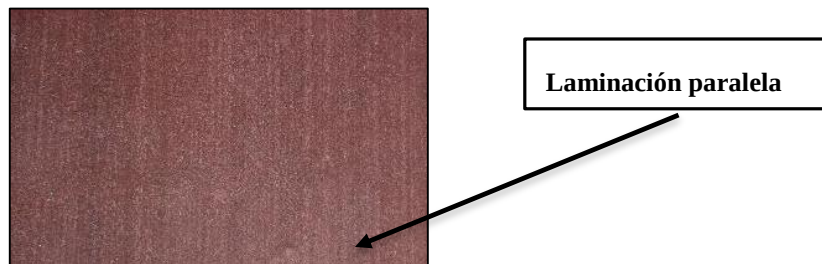
Los datos de densidad y porosidad de esta muestra, se observan en la siguiente tabla (Figura 84)

| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad |
|-------------------------------|-----------|
| 2130                          | 17,1      |

**Figura 84 Tabla de datos de densidad y porosidad de la muestra SP-1F**

- f) **La muestra CA-1E**, es una arenisca roja laminada de grano fino con cemento ferruginoso y ligera presencia de moscovita (Figura 85).

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**



**Figura 85 Muestra CA-1E**

La temperatura ambiente obtenida mientras se realizaba el ensayo de la muestra CA-1E es 20.6°C. En esta muestra se obtienen datos de temperatura hasta los setenta minutos, que es cuando empieza a disminuir la temperatura. El valor pico de temperatura tanto interior como exterior está en el minuto sesenta (Figura 86).

| Tiempo | T <sub>interior</sub> | T <sub>exterior</sub> |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 0      | 20,2                  | 20,2                  |
| 5      | 32,1                  | 31,1                  |
| 10     | 39,3                  | 38,1                  |
| 15     | 42,7                  | 40,0                  |
| 20     | 47,6                  | 47,0                  |
| 25     | 50,7                  | 47,2                  |
| 30     | 52,8                  | 50,9                  |
| 35     | 52,8                  | 51,7                  |
| 40     | 52,1                  | 51,3                  |
| 45     | 54,5                  | 52,0                  |
| 50     | 55,7                  | 53,0                  |
| 55     | 56,6                  | 54,2                  |
| 60     | 58,8                  | 55,4                  |
| 65     | 55,9                  | 54,2                  |
| 70     | 55,4                  | 52,0                  |

**Figura 86 Tabla de datos obtenidos de la muestra CA-1E**

El peso de antes y después de la muestra y las medidas, se muestran en la siguiente tabla (Figura 87)

|                    |         |
|--------------------|---------|
| <b>Peso húmedo</b> | 193,430 |
| <b>Peso seco</b>   | 193,090 |
| <b>Largo</b>       | 0,121   |
| <b>Ancho</b>       | 0,059   |
| <b>Espesor</b>     | 0,012   |

**Figura 87 Tabla de pesos y medidas de la muestra CA-1E**

La densidad y porosidad se muestran en la siguiente tabla (Figura 88):

|                                    |                  |
|------------------------------------|------------------|
| <b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Porosidad</b> |
| 2170                               | 15,17            |

**Figura 88 Tabla de densidad y porosidad de la muestra CA-1E**



## 5.3 CALCULO DE LA CONDUTIVIDAD

- a) **En la muestra CA-2D**, al obtener la diferencia de temperatura (Figura 89), se puede observar que hay datos anómalos, como son los del minuto cero y cuarenta y cinco. Los otros datos son normales debido a que es superior la temperatura interior que la exterior, y por tanto la diferencia da positiva.

| Tiempo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> ) |
|--------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0      | 23,2           | 23,3           | -0,1                              |
| 5      | 34,7           | 34,1           | 0,6                               |
| 10     | 42,8           | 42,1           | 0,7                               |
| 15     | 48             | 42             | 6                                 |
| 20     | 50,6           | 49,6           | 1                                 |
| 25     | 53,3           | 53             | 0,3                               |
| 30     | 55,7           | 54,1           | 1,6                               |
| 35     | 56,1           | 55,5           | 0,6                               |
| 40     | 56,7           | 56             | 0,7                               |
| 45     | 55,9           | 56,1           | -0,2                              |

**Figura 89** Tabla de resultado de (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) de la muestra CA-2D

La temperatura del minuto cero, se va a despreciar debido a que puede ser un error en la medida que dé más temperatura por una parte que por la otra, debido a que no se está aplicando calor a la muestra.

La temperatura del minuto cuarenta y cinco también se va despreciar, debido a que la arenisca llega al máximo de temperatura que es capaz de transferir y se comporta a partir de ese valor de forma constante.

Con las medidas que se han obtenido, se calcula el área de la muestra de arenisca, al ser una muestra rectangular se calcula (Ecuación 30):

$$A = b \cdot h$$

**Ecuación 30**

Siendo A, el área rectangular; b, la base del rectángulo; h, la altura del rectángulo.

|       |       |   |                 |
|-------|-------|---|-----------------|
| Largo | 0,120 | ➔ | Área<br>0,00732 |
| Ancho | 0,061 |   |                 |

Una vez obtenido el área, se obtiene cociente del área entre el espesor:

$$\frac{A}{x} = \frac{0.00732}{0.01} = 0.732$$

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

Con todos los datos obtenidos, se puede calcular la conductividad térmica de cada tiempo que se ha medido. (Figura 90).

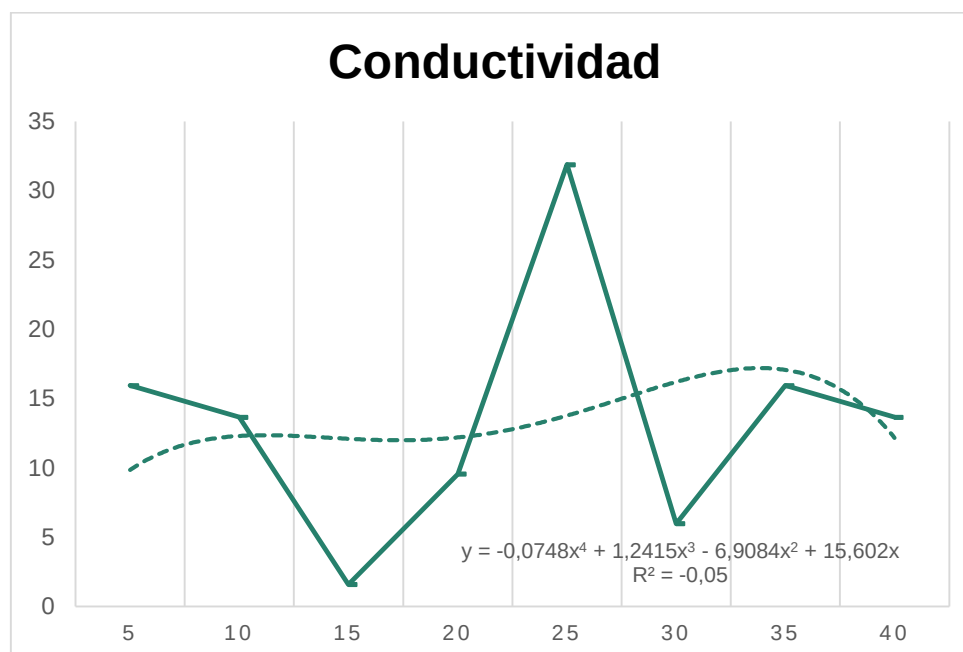
| Tiempo | Conductividad |
|--------|---------------|
| 5      | 15,94         |
| 10     | 13,66         |
| 15     | 1,59          |
| 20     | 9,56          |
| 25     | 31,88         |
| 30     | 5,98          |
| 35     | 15,94         |
| 40     | 13,66         |

**Figura 90** Tabla de conductividades de la muestra CA-2D

Se obtiene la conductividad media de la muestra de arenisca

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| <b>Conductividad media</b> | <b>13.52</b> |
|----------------------------|--------------|

En el gráfico de la conductividad respecto el tiempo se observa que tiene unos valores pico muy pronunciados frente al resto, esto puede ser debido a algún error en la medida



- b) **En la muestra CA-3E**, obteniendo  $(T_1 - T_2)$ , se observa que hay varios datos anómalos como es el del minuto cero, veinte y treinta (Figura 91).

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

| Tiempo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> ) |
|--------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0      | 20,2           | 20,3           | -0,1                              |
| 5      | 32,6           | 32,5           | 0,1                               |
| 10     | 39,8           | 38,6           | 1,2                               |
| 15     | 41,2           | 40,6           | 0,6                               |
| 20     | 44             | 44,7           | -0,7                              |
| 25     | 48,3           | 47,7           | 0,6                               |
| 30     | 47,6           | 48,6           | -1                                |

**Figura 91 Tabla de resultado de (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) de la muestra CA-3E**

Las medidas de temperatura del minuto cero se van a despreciar, debido a que puede ser un error de medida.

En el minuto veinte ocurre que la temperatura exterior es más alta que la interior, se supone que es un error de medida, por lo que también se va a despreciar.

En el minuto treinta el comportamiento de la muestra a aplicarle temperatura, dentro de un rango es la misma dentro que fuera, por lo que no se toman más datos.

Después se obtienen los datos del área, A/x, se puede observar que todas las muestras no miden lo mismo exactamente;

|       |       |   |      |       |
|-------|-------|---|------|-------|
| Largo | 0,120 | ➔ | Área | 0,009 |
| Ancho | 0,071 |   |      |       |

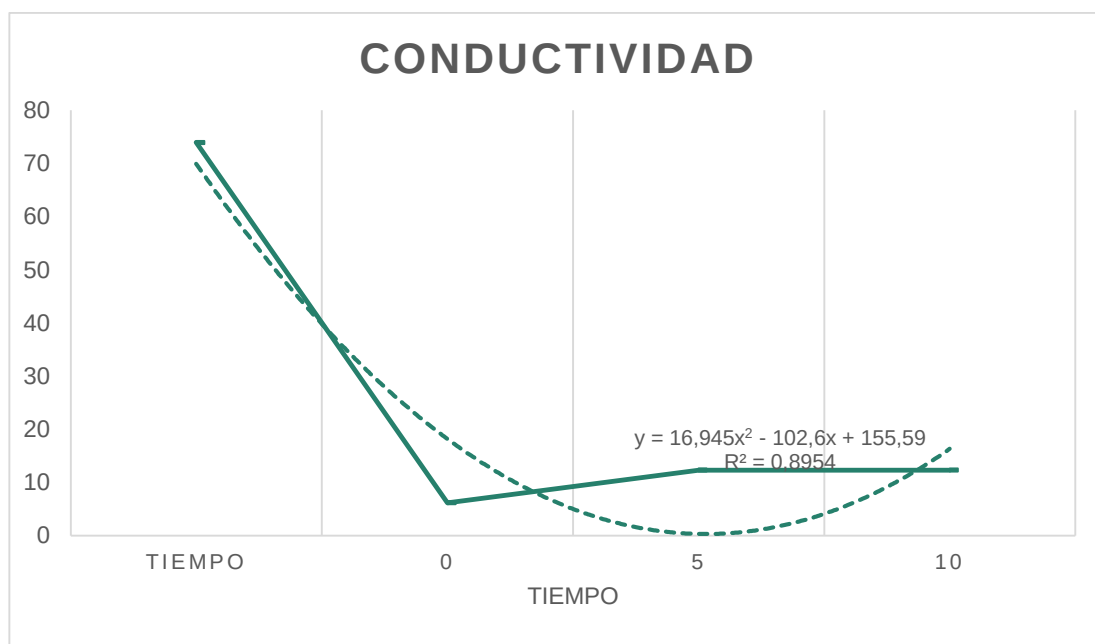
$$\frac{A}{x} = \frac{0.00732}{0.009} = 0.947$$

Finalmente se obtiene la conductividad de cada tiempo, despreciando los anómalos (Figura 92).

| Tiempo | Conductividad | ➔ | Conductividad media | 26.18 |
|--------|---------------|---|---------------------|-------|
| 5      | 73,94         |   |                     |       |
| 10     | 6,16          |   |                     |       |
| 15     | 12,32         |   |                     |       |
| 25     | 12,32         |   |                     |       |

**Figura 92 Tabla de conductividades de la muestra CA-3E**

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**



- c) En la muestra SP-2E, apenas se obtienen datos anómalos. Salvo el del minuto cincuenta en el que se empieza a mantener la temperatura constante y por el que no se obtienen más resultado, este dato como los anteriores se desprecia (Figura 93)

| Tiempo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> ) |
|--------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0      | 27,4           | 27,3           | 0,1                               |
| 5      | 38,0           | 36,7           | 1,3                               |
| 10     | 44,1           | 41,7           | 2,4                               |
| 15     | 48,5           | 46,6           | 1,9                               |
| 20     | 51,0           | 50,5           | 0,5                               |
| 25     | 53,6           | 52,3           | 1,3                               |
| 30     | 54,2           | 53,1           | 1,1                               |
| 35     | 56,1           | 54,8           | 1,3                               |
| 40     | 54,3           | 52,1           | 2,2                               |
| 45     | 55,2           | 53,4           | 1,8                               |
| 50     | 55,3           | 55,6           | -0,3                              |

**Figura 93** Tabla de resultados obtenidos (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) de la muestra SP-2E

Se obtiene también el área para calcular la conductividad:

|       |       |   |      |       |
|-------|-------|---|------|-------|
| Largo | 0,121 | ➔ | Área | 0,007 |
| Ancho | 0,061 |   |      |       |

$$\frac{A}{x} = \frac{0,007}{0,009} = 0,82$$

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

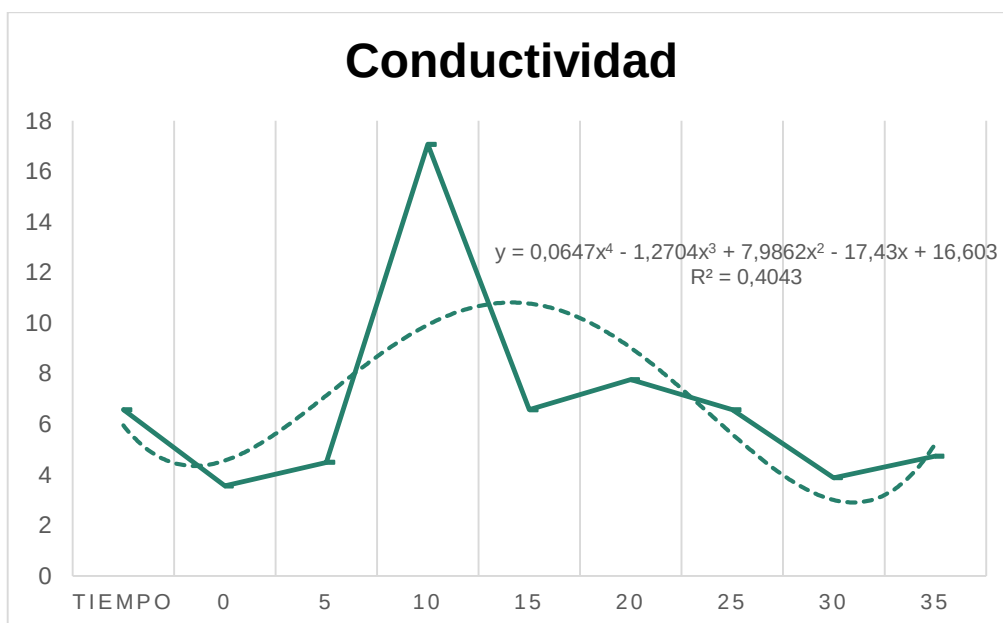
Se obtienen los datos de conductividad de cada punto (Figura 94)

| Tiempo | Conductividad |
|--------|---------------|
| 0      | 85,35         |
| 5      | 6,57          |
| 10     | 3,56          |
| 15     | 4,49          |
| 20     | 17,07         |
| 25     | 6,57          |
| 30     | 7,76          |
| 35     | 6,57          |
| 40     | 3,88          |
| 45     | 4,74          |



**Conductividad media 14,66**

**Figura 94** Tabla de conductividades de la muestra SP-2E



- d) **En la muestra B-1E**, se calcula también  $(T_1 - T_2)$  y se observa el mismo caso que las anteriores, que en el minuto cero, da un error a la hora de medir, por lo que se desprecia, y en el minuto cuarenta y cinco, llega a un equilibrio más o menos entre su cara interior y exterior por lo que también se desprecia. (Figura 95)

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

| Tiempo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> ) |
|--------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0      | 24,6           | 24,9           | -0,3                              |
| 5      | 35,5           | 35,1           | 0,4                               |
| 10     | 42,9           | 42,2           | 0,7                               |
| 15     | 46,8           | 46,2           | 0,6                               |
| 20     | 51,2           | 49,8           | 1,4                               |
| 25     | 53             | 52,1           | 0,9                               |
| 30     | 55,4           | 54,8           | 0,6                               |
| 35     | 55,2           | 53,6           | 1,6                               |
| 40     | 56,8           | 56,2           | 0,6                               |
| 45     | 56             | 56,9           | -0,9                              |

**Figura 95** Tabla de resultados T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> de la muestra B-1E

Después se obtiene a partir de los datos obtenidos la conductividad en cada punto

|              |       |          |             |              |
|--------------|-------|----------|-------------|--------------|
| <b>Largo</b> | 0,122 | <b>→</b> | <b>Área</b> | <b>0,007</b> |
| <b>Ancho</b> | 0,061 |          |             |              |

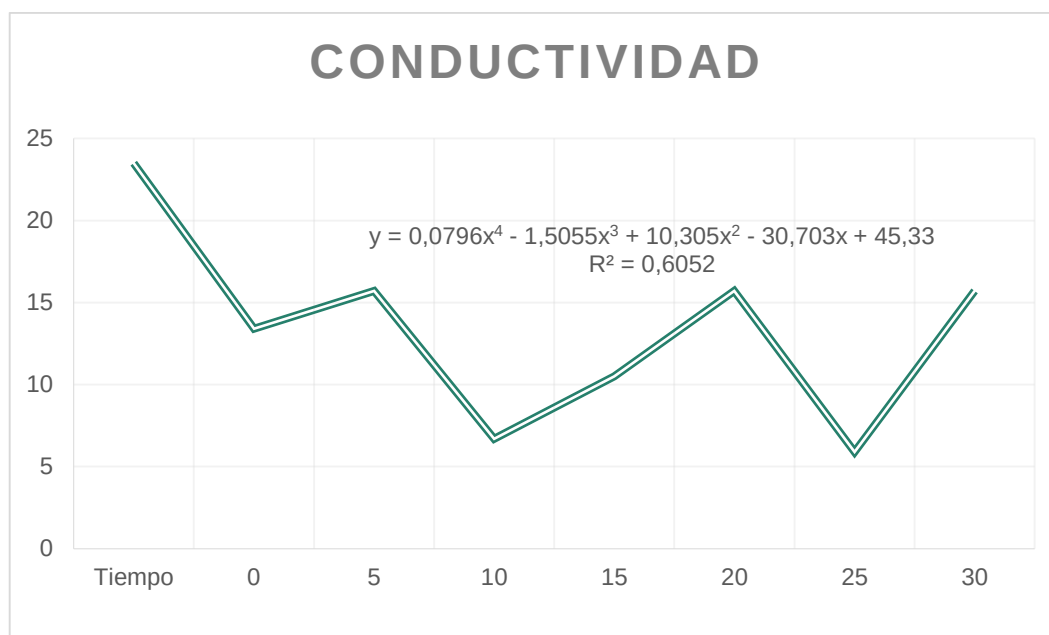
$$\frac{A}{x} = \frac{0.007}{0.01} = 0.744$$

Se observa que despreciando los datos del minuto cero y cuarenta y cinco la conductividad es más o menos la misma dentro de un rango, por lo que se puede calcular la conductividad media (Figura 96)

| Tiempo | Conductividad | <b>→</b> | <b>Conductividad media</b> | <b>11,9</b> |
|--------|---------------|----------|----------------------------|-------------|
| 5      | 23,5          |          |                            |             |
| 10     | 13,4          |          |                            |             |
| 15     | 15,7          |          |                            |             |
| 20     | 6,7           |          |                            |             |
| 25     | 10,5          |          |                            |             |
| 30     | 15,7          |          |                            |             |
| 35     | 5,9           |          |                            |             |
| 40     | 15,7          |          |                            |             |

**Figura 96** Tabla de las conductividades de la muestra B-1E

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**



- e) En la muestra SP-1F, cuando se obtiene a partir del minuto cincuenta y cinco, la temperatura empieza a ser constante, por lo que se desprecia ese valor, al ser negativo.(Figura 97)

| Tiempo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> ) |
|--------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0      | 21,1           | 20,9           | 0,2                               |
| 5      | 34,3           | 33,2           | 1,1                               |
| 10     | 42,8           | 41,7           | 1,1                               |
| 15     | 45,6           | 45,5           | 0,1                               |
| 20     | 50,5           | 48,7           | 1,8                               |
| 25     | 52,7           | 49,8           | 2,9                               |
| 30     | 53,7           | 51,5           | 2,2                               |
| 35     | 55,7           | 53,7           | 2                                 |
| 40     | 55,9           | 54,2           | 1,7                               |
| 45     | 56,2           | 51,1           | 5,1                               |
| 50     | 56,5           | 51             | 5,5                               |
| 55     | 54,1           | 54,5           | -0,4                              |
| 60     | 56,4           | 55,1           | 1,3                               |
| 65     | 56,3           | 54,4           | 1,9                               |

**Figura 97 Tabla de resultados de T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> de la muestra SP-1F**

Se obtiene todo para calcular la conductividad de cada minuto del ensayo y luego finalmente la conductividad media.



**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

|       |       |
|-------|-------|
| Largo | 0,123 |
| Ancho | 0,060 |

➔

|      |       |
|------|-------|
| Área | 0,007 |
|------|-------|

$$\frac{A}{x} = \frac{0.007}{0.009} = 0.82$$

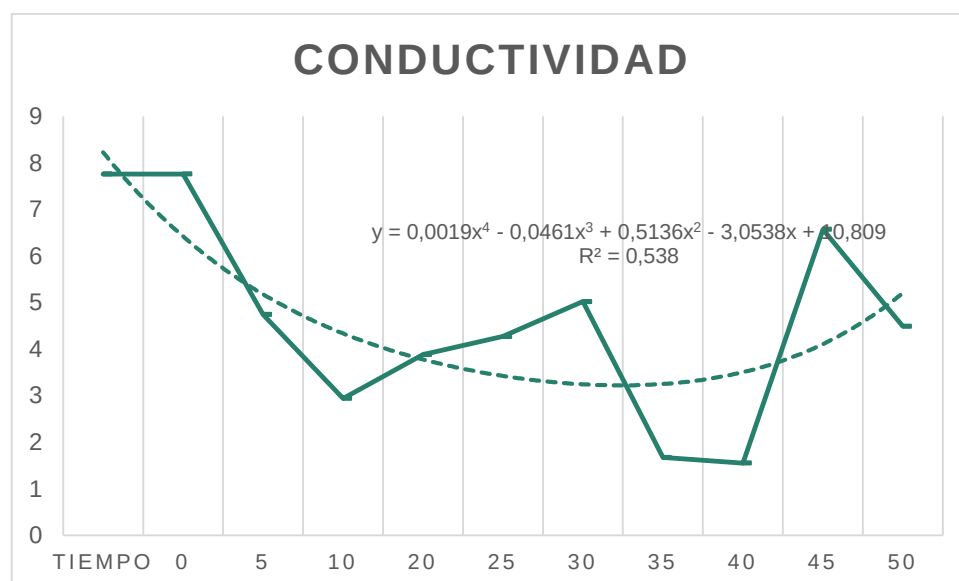
Una vez obtenida la conductividad, se calcula la conductividad media con los datos obtenidos (Figura 98).

| Tiempo | Conductividad |
|--------|---------------|
| 0      | 42,68         |
| 5      | 7,76          |
| 10     | 7,76          |
| 15     | 85,37         |
| 20     | 4,74          |
| 25     | 2,94          |
| 30     | 3,88          |
| 35     | 4,27          |
| 40     | 5,02          |
| 45     | 1,67          |
| 50     | 1,55          |
| 60     | 6,57          |
| 65     | 4,49          |

➔

|                     |       |
|---------------------|-------|
| Conductividad media | 13,74 |
|---------------------|-------|

**Figura 98** Tabla de conductividad de la muestra SP-1F



**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

- f) En la muestra CA-1E, solo se va a despreciar el dato del minuto cero, porque al no aplicarle el ensayo todavía, puede hacer que varía la conductividad media y de error.(Figura 99)

| Tiempo | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | (T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub> ) |
|--------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0      | 20,2           | 20,2           | 0                                 |
| 5      | 32,1           | 31,1           | 1                                 |
| 10     | 39,3           | 38,1           | 1,2                               |
| 15     | 42,7           | 40             | 2,7                               |
| 20     | 47,6           | 47             | 0,6                               |
| 25     | 50,7           | 47,2           | 3,5                               |
| 30     | 52,8           | 50,9           | 1,9                               |
| 35     | 52,8           | 51,7           | 1,1                               |
| 40     | 52,1           | 51,3           | 0,8                               |
| 45     | 54,5           | 52             | 2,5                               |
| 50     | 55,7           | 53             | 2,7                               |
| 55     | 56,6           | 54,2           | 2,4                               |
| 60     | 58,8           | 55,4           | 3,4                               |
| 65     | 55,9           | 54,2           | 1,7                               |
| 70     | 55,4           | 52             | 3,4                               |

**Figura 99** *Tabla de los resultados T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> de la muestra CA-1E*

Se obtiene el área y luego A/X, para calcular la conductividad

|       |       |                                                                                     |      |       |
|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|
| Largo | 0,121 |  | Área | 0,007 |
| Ancho | 0,059 |                                                                                     |      |       |

$$\frac{A}{x} = \frac{0.007}{0.012} = 0.595$$

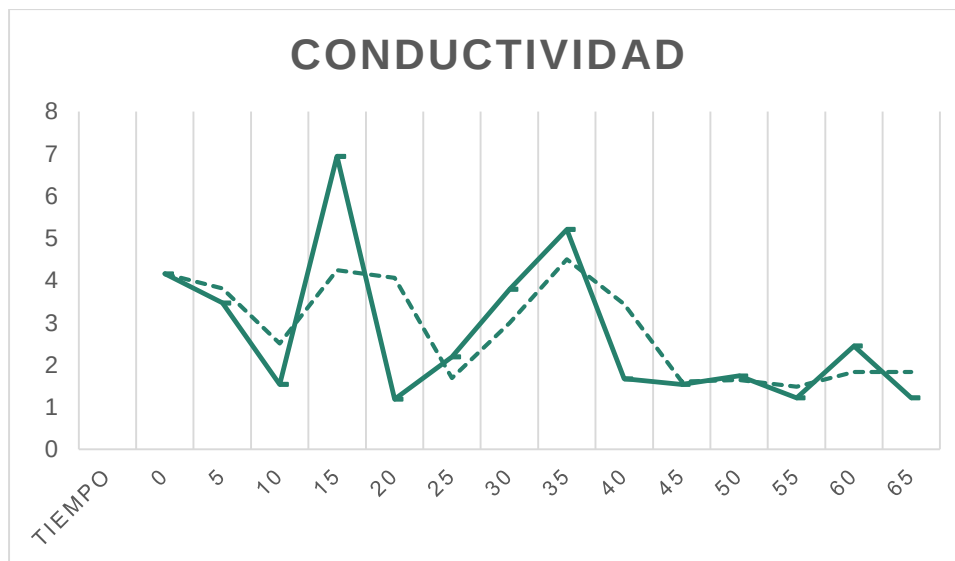
En esta muestra no se van a despreciar datos, a la hora de calcular la conductividad media, debido a que están todos más o menos dentro de un mismo rango como se observa en la tabla (Figura 100)

| Tiempo | Conductividad |
|--------|---------------|
| 5      | 4,16          |
| 10     | 3,47          |
| 15     | 1,54          |
| 20     | 6,94          |
| 25     | 1,19          |
| 30     | 2,19          |
| 35     | 3,79          |
| 40     | 5,21          |
| 45     | 1,67          |
| 50     | 1,54          |
| 55     | 1,74          |
| 60     | 1,22          |
| 65     | 2,45          |
| 70     | 1,22          |



**Conductividad media**      **2,74**

**Figura 100** *Tabla de las conductividades de a muestra CA-1E*



## 5.4 COMPARACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

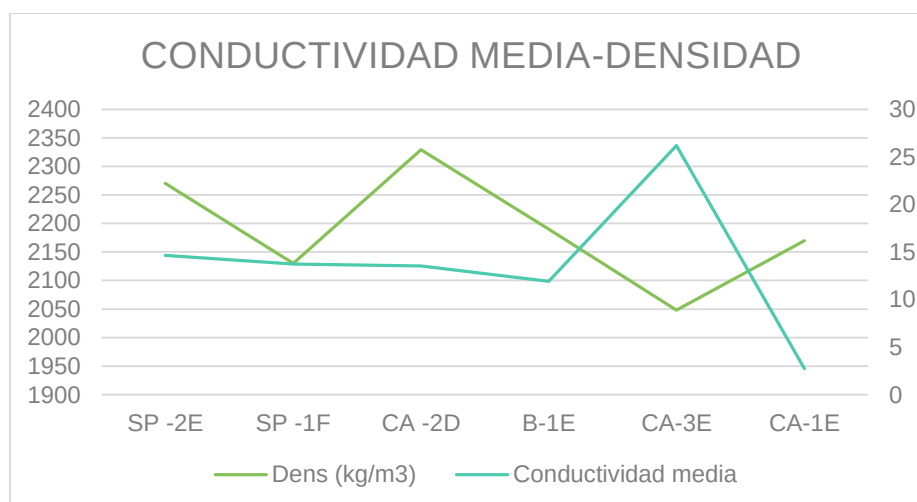
Las conductividades medias de cada una de las areniscas, con su correspondiente porosidad y densidad se pueden observar en la siguiente tabla. (Figura 101)

**“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”**

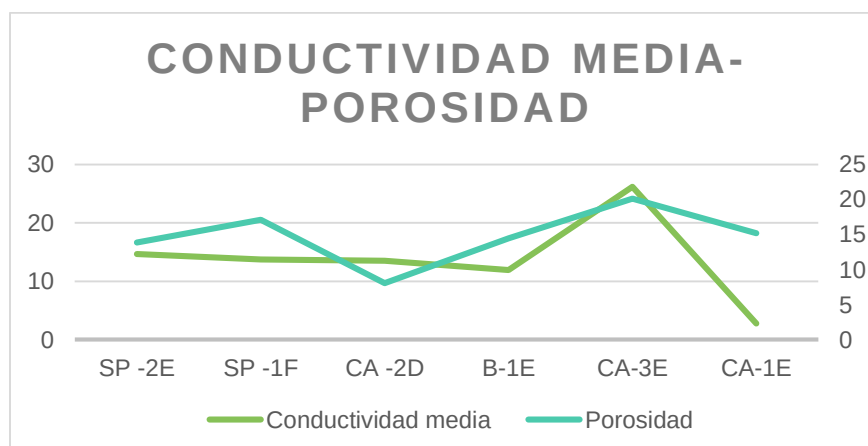
|              | Dens (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad | Conductividad media |
|--------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| <b>SP-2E</b> | 2270                      | 13,86     | 14,65               |
| <b>SP-1F</b> | 2130                      | 17,10     | 13,74               |
| <b>CA-2D</b> | 2329                      | 8,07      | 13,52               |
| <b>B-1E</b>  | 2190                      | 14,44     | 11,90               |
| <b>CA-3E</b> | 2048                      | 20,10     | 26,18               |
| <b>CA-1E</b> | 2170                      | 15,17     | 2,74                |

**Figura 101** Tabla resumen de las diferentes muestras de arenisca

En la gráfica densidad- conductividad media de las areniscas obtenidas, se observa que hay diferentes picos y no hay nada de manera constante. Existe una ley general que relaciona bajas conductividades para bajas densidades, porque la ligereza del material suele estar producida por huecos en su interior ocupados por aire, que es mucho más aislante que el material compacto



En la gráfica no se aprecia mucho pero la porosidad es inversamente proporcional a la conductividad térmica de las muestras de arenisca. La porosidad influye tanto en las propiedades físicas de la roca, como en la durabilidad y calidad del material. Una roca porosa absorberá más agua, por lo que sus minerales serán más susceptibles al ataque por el propio agua o por otros agentes químicos.



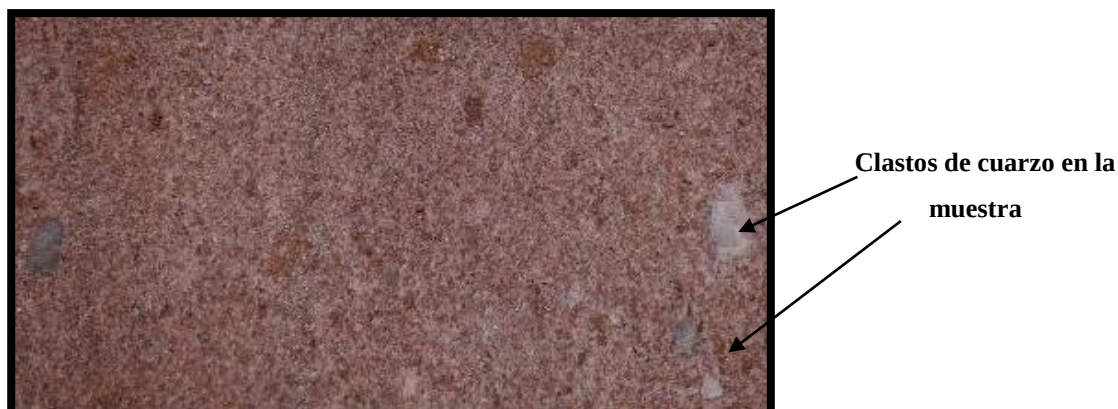
# CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

## 6 DISCUSIÓN

Las muestras de areniscas ensayadas presentan diferentes aspectos que condicionan la efectividad del ensayo, esencialmente relacionados con la petrografía de estas rocas.

De las seis muestras ensayadas, tres se presentan con características petrográficas muy dispares entre ellas y con las otras tres. Así las muestras B-1E, CA-1E y SP-2E no son areniscas del mismo tipo que las otras tres muestras.

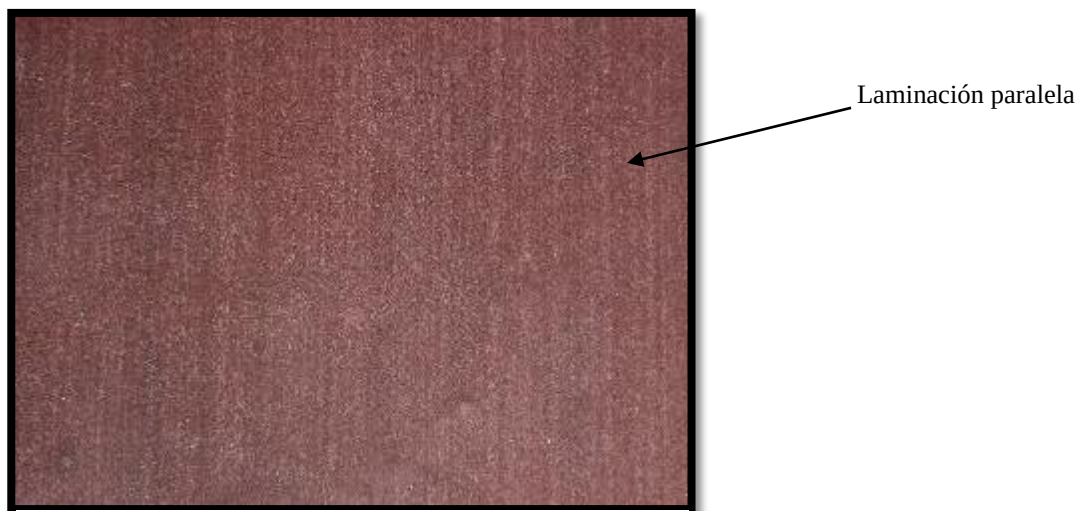
**La muestra B-1E**, (Figura 102) es una arenisca roja de tamaño de grano medio-fino microconglomerática con clastos de cuarzo de tamaños superiores a 1mm. Presenta una elevada porosidad con un ligero bandeado. Su conductividad térmica es baja, debido a la importante porosidad que presenta y a la propia anisotropía de la roca.



*Figura 102 Muestra de arenisca B-1E*

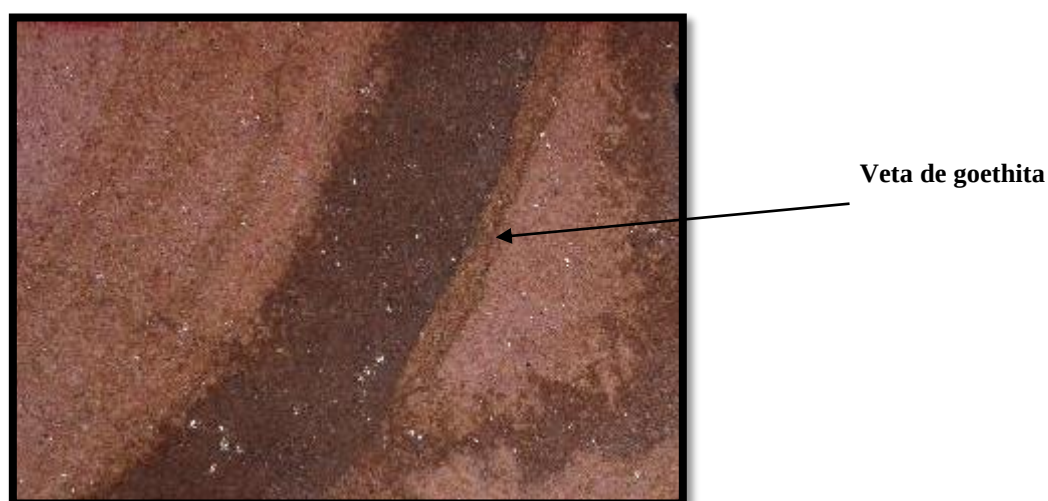
**La muestra CA-1E** (Figura 103), es una arenisca roja laminada de grano fino con cemento ferruginoso y ligera presencia de moscovita. Esta muestra tiene una conductividad térmica muy baja, especialmente comparándola con el resto de las areniscas. La causa principal puede ser la anisotropía de la muestra y el tamaño de grano tan fino que presenta. El ensayo se ha realizado paralelamente a la laminación, habría que ensayar la muestra en otra dirección perpendicular. Además, presenta un grosor mayor que el resto de las muestras por lo que en las mismas condiciones de ensayo, el calor se transmitirá peor.

*“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”*



**Figura 103** Muestra de arenisca CA-1E

La muestra SP-2E (Figura 104), es una arenisca de grano fino-medio, porosidad media y densidad alta, con abundante mica moscovita diseminada por toda la roca. Además, presenta una veta de hierro (goethita) que constituye una anisotropía importante en el comportamiento de esta roca. Aparentemente por la existencia de esa veta de hierro, la conductividad térmica en esta muestra tendería a ser alta a muy alta. Sin embargo, esta conductividad presenta un valor de 14.66. Por un lado, se trata de una muestra con alta porosidad y por otro la existencia de abundante mica moscovita, mineral que entre sus propiedades se encuentra la de ser aislante térmico, podría justificar que la conductividad térmica no fuera muy elevada.



**Figura 104** Muestra de arenisca SP-2E

Como se ha dicho, estas tres muestras difieren notablemente de las otras tres ya que cada una de ellas tiene una singularidad petrográfica que condiciona su comportamiento frente al paso del calor.

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Sin embargo, CA-2D, SP-1F y CA-3E son areniscas con una composición mineralógica similar pero con diferencias petrográficas relacionadas principalmente con el tamaño de grano y porosidad.

**La muestra CA-2D** (Figura 105) es una arenisca blanca de grano fino cuarzosa, compacta, de baja porosidad y elevada densidad. Presenta una conductividad térmica de 13.52.



***Figura 105 Muestra de arenisca CA-2D***

**La muestra SP-1F** (Figura 106) es una arenisca ocre de grano fino-medio, muy porosa, cuarzosa, algo micácea, con restos de hidróxidos de hierro y que presenta una conductividad de 13.75.



***Figura 106 Muestra de arenisca SP-1F***

**La muestra CA-3E** (Figura 107) es una arenisca amarilla de grano grueso, abundante presencia de hidróxidos de hierro entre los granos, elevada porosidad y sin minerales aislantes. Presenta una conductividad térmica de 26.18, notablemente más alta que las dos anteriores.





*Figura 107 Muestra de arenisca CA-3E*

Las areniscas son rocas formadas por la unión de granos de diferente naturaleza. En areniscas de grano fino existe una mayor cantidad de granos que cubren una superficie y por tanto una mayor cantidad de uniones entre granos que en las areniscas de grano grueso. Eso genera una inhomogeneidad al paso del calor. Por otro lado, la conductividad térmica en un material está condicionada por muchas variables, entre ellas la homogeneidad del material que atraviese. Una arenisca de grano grueso presenta un número de uniones intergranulares menor que una arenisca de grano fino (a igual distancia la arenisca de grano fino tendrá más granos unidos entre ellos), por lo que la homogeneidad al paso del calor será mayor y la conductividad térmica aumentará.

Según este razonamiento, el tamaño de grano parece influir en la conductividad térmica, de tal modo que CA-2D, con el grano más fino, tendrá una conductividad térmica menor que SP-1F y esta a su vez menor que CA-3E.

Se pueden, por tanto, ordenar:

$$CA-2D < SP-1F < CA-3E$$

$$13.5 < 13.75 < 26.18$$

Parece ser, según los resultados de este estudio, que el tamaño de grano influye en la conductividad térmica de una roca arenisca. (Figura 108)

**GRANO FINO**

**GRANO FINO-MEDIO**

**GRANO GRUESO**



*Figura 108 Comparativa de las muestras de arenisca*

# CAPÍTULO 7: CONCLUSIÓN

## 7 CONCLUSIÓN

### 7.1 CONCLUSIONES COMO RESULTADO DE ESTE ESTUDIO

Es necesario tener unos conocimientos previos sobre la conductividad y sobre las características petrográficas de las rocas antes de realizar el estudio. Medir la conductividad de la roca no es tan sencillo, puesto que hay que tener en cuenta distintos parámetros y tener un conocimiento de cómo influye la porosidad, la densidad, temperatura ambiente, condiciones externas e internas, humedad relativa, y las características petrográficas de las areniscas.

El método realizado para obtener la conductividad térmica es experimental y al no tener equipos adecuados es muy limitado. Los factores que han afectado a que este ensayo no se realice de la manera correcta son:

- Muchos de los datos de temperatura tomados de las areniscas presentan anomalías y esto es debido a que no está bien aisladas las muestras de arenisca.
- La temperatura ambiente también es un factor que hay que considerar, y en este ensayo, cada una de las muestras de arenisca ha estado a una diferente temperatura.
- Se ha considerado que el hilo conductor, que era el que daba calor a las muestras de arenisca, no presentaba pérdidas a la hora de calcular la conductividad y realmente sí presentaba pérdidas.
- Al tener las muestras de arenisca diferentes características petrográficas, el comportamiento frente al calor para el cálculo de la conductividad es distinto.
- Para tomar las medidas de temperatura de las muestras de arenisca, tanto exterior como interior, se ha tenido que levantar la muestra, generando pérdidas de temperatura.
- Al haber tenido las areniscas a diferentes temperaturas ambientes, la humedad relativa de cada una de ellas ha variado respecto a cuándo se las sacó del horno.

# **CAPÍTULO 8:**

# **BIBLIOGRAFÍA**

## 8 BIBLIOGRAFIA

Instituto Tecnológico Geominero de España. (1988). Monografías de sustancias minerales de Cantabria. Madrid: Informes y proyectos, S.A.

Bastida, F. (2005). *Geología. Una visión de las ciencias de la Tierra*. Gijón: EDICIONES TREA, S.L.

Benavente, D. (s.f.). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. D. Benavente.

Contrera, M. C. (14 de Agosto de 2015). *prezi*. Obtenido de <https://prezi.com/ajasuphbyfnm/mecanismos-de-transferencia-de-calor/>

Diez, P. F. (s.f.). *Energía Geotérmica*.

Dorado, A. C. (1989). *Petrográfica básica. Texturas, clasificación y nomenclatura de las rocas*. Madrid: PARANINFO, S.A.

Edward J. Tarbuck, F. K. (2013). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: PEARSON EDUCATION S.A.

Expondo.es. (s.f.). *Expondo.es*. Obtenido de <http://www.expondo.es/estufa-de-laboratorio/>

hipertextual.com. (s.f.). Obtenido de <https://hipertextual.com/2015/05/efecto-joule>

I. Mazán, M. F. (1996). *Estudio geotérmico en la mitad Occidental de España*. Geogaceta.

IGME. (s.f.). Obtenido de [igme.es](http://igme.es)

Instituto Tecnológico Geominero de España. (1990). *Cantabria. Mapa geológico-minero 1:100.000*. Madrid: Stelvio, S.L.

J. Diez Campos, E. G. (2007). *Determinación experimental de la conductividad térmica de materiales de construcción*. Lugo.

L. Lira-Cortés, G. R.-L. (2008). *Medición de la Conductividad Térmica de algunos materiales utilizados en la edificación*.

laboratorio, I. d. (s.f.). *Instrumentos de laboratorio*. Obtenido de <http://www.instrumentosdelaboratorio.net/2012/05/balanza-de-laboratorio.html>

María R. Aeberhard, J. J. (2006). *Diseño y construcción de un equipo de placa caliente para la determinación de la conductividad térmica*.

Maroto, G. F. (2015). *Propiedades en las rocas ornamentales, caracterización y normalización*. Torrelavega.

Mazorra, E. G. (2015). *TERMOGRAFÍA, ESTUDIO E INFLUENCIA DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS*.

mindomo.com. (s.f.). Recuperado el 10 de Julio de 2016, de <https://www.mindomo.com/es/mindmap/como-fluye-el-calor-1b36e3941caa4060aca0a3569b873980>

MUÑOZ, P. P. (2012). *Estudio del Comportamiento Térmico de Pavimentos de Mezcla Bituminosa y Análisis de un Colector Solar Asfáltico Multicapa*.

***“Estudio de investigación sobre la transmisividad térmica en areniscas de Cantabria”***

---

Revuelta, E. S. (2015). *Influencia de las precipitaciones en la ocurrencia de los movimientos de ladera en Cantabria*.

Robertson, E. C. (1988). *Thermal properties of rocks*. Virginia.

Saúl García Duarte, O. J. (2012). *Metodología para la medición de la conductividad térmica de los materiales de construcción*.

tme.eu. (s.f.). *Alimentador de laboratorio*. Obtenido de <http://www.tme.eu/es/Document/24bf7424fbca517af9546f8b3c5a4eb3/INB-ZAS-LAB-ES.pdf>

Universidad de Sevilla. (s.f.). Obtenido de [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Segundo\\_principio\\_de\\_la\\_termodin%C3%A1mica\\_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Segundo_principio_de_la_termodin%C3%A1mica_(GIE))

wikipedia. (s.f.). Obtenido de [wikipedia.es](http://wikipedia.es)