



Universidad de Oviedo

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN, MINERO-AMBIENTAL
Y DE PROYECTOS**

**ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO,
CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO
PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y
DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO**

TESIS DOCTORAL

D. Carlos Castán Fernández

OVIEDO, 2021



Universidad de Oviedo

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN, MINERO-AMBIENTAL
Y DE PROYECTOS**

**ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO,
CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO
PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y
DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO**

TESIS DOCTORAL

D. Carlos Castán Fernández

Directores

Dr. D. Miguel Ángel Rey Ronco

Dra. Dña. Teresa Alonso Sánchez

OVIEDO, 2021

A mis abuelos, con todo mi amor

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de varias personas, empresas e instituciones a las que quiero mostrar mi agradecimiento.

A mis directores Miguel Ángel Rey y Teresa Alonso por la oportunidad, la confianza y el conocimiento compartido durante estos años.

A la Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología (FICYT), a la Universidad de Oviedo, a la Cátedra HUNOSA y al Gobierno del Principado de Asturias por el respaldo económico.

A Javier Fueyo (Cantera Grado S.L), Diego Alonso y Luis Díaz (grupo Minersa), Juan Carlos Aguilera (FAEN), Gonzalo Rivaya y Paula Braga (grupo Masaveu), Corsino Suárez (Cerámica del Nalón S.A), Ricardo Hevia (Ekogar S.L) y César Rodríguez (grupo Hunosa) por la colaboración recibida.

A los profesores Luis Felipe Verdeja, Juan Asensio, Efrén García, Luis Peñalver y muy especialmente a Francisco Blanco y Rodrigo Álvarez por todo el soporte, disposición y ayuda prestada, muchísimas gracias.

A los técnicos Lucio García-Pertierra, Victor Vega, Emilio Ariño y sobre todo a Antonio Marqués, Germán Marcos y Ramón Argüelles por la dedicación, los sabios consejos y la continua disponibilidad.

A Jon Tapia (Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava) y al profesor Pablo Cienfuegos por vuestro tiempo, amistad y entrega incondicional. Un millón de gracias por haberme hecho el camino más fácil.

MUCHAS GRACIAS.

RESUMEN

Debido al incremento del precio de los combustibles fósiles, al rechazo social de la energía nuclear y a los efectos del calentamiento global, muchos países han empezado a buscar nuevas fuentes de energía renovable que contribuyan a paliar el cambio climático. En esa búsqueda, la energía geotérmica se ha convertido, desde hace unos años, en un protagonista indiscutible, especialmente la conocida como energía geotérmica de muy baja temperatura.

La ventaja más destacable de los recursos geotérmicos de muy baja temperatura es que las condiciones geológicas para su aprovechamiento son muy poco exigentes, y por tanto pueden ser explotados, mediante sondeos geotérmicos, en prácticamente la totalidad del territorio. Además, se trata de una tecnología sostenible y muy eficiente, con unos destacados ahorros energéticos.

El elemento más importante de un sondeo geotérmico es el relleno geotérmico, ya que cumple una serie de funciones fundamentales. Sin embargo, tradicionalmente, no se le ha prestado la suficiente atención. A su vez, la conductividad térmica es el parámetro más importante que caracteriza a los rellenos geotérmicos, y por tanto conocer con precisión su valor posibilita el correcto diseño de la instalación geotérmica de muy baja temperatura. Por todo ello, se antoja necesaria una correcta selección de los componentes y dosificaciones utilizados en el relleno geotérmico, así como una completa caracterización del mismo, pues el uso de un relleno geotérmico adecuado puede suponer un importante ahorro económico y energético durante la vida útil de la instalación geotérmica.

Por otro lado, el empleo de residuos o subproductos industriales se plantea como una vía para obtener un relleno geotérmico más sostenible. El aprovechamiento de estos materiales reduce el volumen depositado en los vertederos y la necesidad de explotar nuevos recursos minerales.

Esta tesis doctoral describe el diseño, construcción, validación y calibración de un equipo de medida de la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos en el rango $0,13-2,80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. El equipo desarrollado, denominado equipo MCT, está basado en el método del Hilo Caliente Transitorio (THW), cuyo fundamento matemático es el modelo de la Fuente Lineal Infinita (ILS), según el cual, a partir de una fuente de calor lineal de longitud infinita y flujo radial, el calor se transmite por conducción en un medio infinito, homogéneo e isótropo.

El equipo MCT consta, principalmente, de un hilo de calentamiento de nicromo, una fuente de alimentación regulable, un sensor de temperatura (termopar tipo K) y un registrador de datos. El equipo MCT destaca por que permite medir materiales conformados y disgregados y por ser un equipo de fácil construcción y manejo, fiable, económico y ligero.

Para la validación y calibración del equipo MCT desarrollado se han utilizado 4 muestras-patrón con conductividad térmica conocida. También se midió la conductividad térmica de 4 rellenos geotérmicos de uso común (bentonita, pasta de cemento, mortero de cemento con arena y mortero de cemento con bentonita), utilizando el equipo MCT y el equipo comercial Shotherm QTM-F1, también basado en el método THW. Finalmente, se ha determinado que, en las condiciones y rango de conductividades térmicas estudiadas, el equipo MCT tiene una precisión relativa del 5 % y una exactitud relativa del 3 %. Se puede concluir que dicho equipo presenta una precisión y exactitud similares a las de los equipos comerciales, pero con un peso y coste económico mucho menor.

Por otra parte, también se describe en esta tesis el desarrollo de un mortero geotérmico, denominado MG 7. Se trata de un mortero seco (predosificado) de base cemento, con una conductividad térmica de $2,01 \pm 0,08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ($K=2$) y en el cual el 30 % de los áridos procede de residuos industriales, tales como colas de lavadero, escoria blanca, cenizas volantes y microsilíce. El mortero MG 7 también lleva un 2 % de nanopartículas de sílice.

En la caracterización del mortero MG 7 se han utilizado las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de Rayos X (XRD), Espectrometría de Fluorescencia de rayos X (XRF), Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) y Espectrometría de Absorción Atómica (AAS), así como ensayos de turbidez, conductividad eléctrica, pH, densidad aparente, exudación, granulometría, porosidad abierta, resistencia mecánica, adherencia, permeabilidad, retracción, conductividad térmica, consistencia, tiempo de fraguado y durabilidad.

Los resultados obtenidos demuestran que el mortero MG 7 presenta, en general, mejores propiedades que los morteros geotérmicos comerciales.

PALABRAS CLAVE: energía geotérmica de muy baja temperatura, medida de la conductividad térmica, Hilo Caliente Transitorio (THW), Fuente Lineal Infinita (ILS), sondeo geotérmico, relleno geotérmico, mortero geotérmico, subproductos industriales, nanosilíce.

ABSTRACT

Due to the increase in the price of fossil fuels, the social rejection of nuclear power and the effects of global warming, several countries have begun to look for new renewable energy resources which mitigate climate change. In this search, geothermal energy has become an unquestionable protagonist for a few years ago, especially the so-called Ground Source Heat Pump (GSHP) systems.

The main advantage of the Ground Source Heat Pump (GSHP) systems is that the geological conditions for using it are undemanding and, thus, these energy resources can be used by means of Borehole Heat Exchange (BHE), almost throughout the whole territory. Moreover, it is a sustainable and very efficient energy with remarkable energy savings.

The most important element of a Borehole Heat Exchange (BHE) is the geothermal backfill material, since it fulfils several essential functions. However, traditionally not much attention has been focused on it. Furthermore, thermal conductivity is the most important parameter referring to the geothermal backfill materials, therefore knowing with precision its value makes it possible the correct design of the geothermal installation. For all these reasons, a correct selection of the components and mix proportions used in the geothermal backfill material, as well as a complete characterization seems necessary because the use of an appropriate geothermal backfill material can have important economic and energy savings during the lifetime of the geothermal installation.

On the other hand, the use of industrial waste or by-products is considered as a way to obtain a more sustainable geothermal backfill material. The use of these materials reduces the volume landfilled and the necessity of exploiting new mineral resources.

This doctoral thesis describes the design, construction, validation and calibration of an apparatus for measuring the thermal conductivity of geothermal backfill materials in the range of 0.13-2.80 W/m·K. The developed apparatus, named MCT apparatus, is based on the Transient Heat Wire (THW) method, whose mathematical basis is the Infinite Linear Source (ILS) model, where from a linear heat source with infinite length and radial heat flow, the heat transfer occurs by conduction in an infinite homogeneous isotropic medium.

The MCT apparatus mainly consist of a nichrome hot wire, an adjustable DC power supply, a temperature sensor (K-type thermocouple) and a datalogger. The MCT apparatus is notable for being able to measure shaped materials as well as powder materials. It is also an easy to build and use apparatus which is reliable, economical and light.

For the validation and calibration of the developed MCT apparatus, 4 standard samples have been used, with a known thermal conductivity. The thermal conductivity of 4 geothermal backfill materials of common use has also been measured (bentonite, neat cement, cement-sand mortar, and cement-bentonite mortar). For this purpose, both the MCT apparatus and the Shotherm QTM-F1 thermal conductivity meter were used. The latter is also based on the THW method. Finally, it has been determined that, under the conditions and in the range of the studied thermal conductivities, the MCT apparatus has a relative precision of 5 % and a relative accuracy of 3 %. It can be concluded that the MCT apparatus has a precision and accuracy similar to those of commercial meters, but with a much lower weight and economic costs.

On the other hand, this doctoral thesis also describes the development of a geothermal grout, named MG 7. It is a dry mortar (pre-dosed cement-based grout) with a thermal conductivity of $2.01 \pm 0.08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ($K=2$) and in which 30 % of aggregates come from industrial waste, such as mine tailings, ladle furnace slag, fly ash and silica fume. This geothermal grout also contains 2 % of silica nanoparticles.

For the characterization of the MG 7 geothermal grout, the following techniques have been used: Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), Atomic Absorption Spectrometry (AAS), as well as tests of turbidity, electrical conductivity, pH, bulk density, bleeding, particle size analysis, open porosity, compressive and flexural strength, adherence strength, permeability, linear shrinkage, thermal conductivity, consistence, setting time and durability.

The results obtained prove that the MG 7 geothermal grout has, in general, better properties than commercial geothermal grouts.

KEY WORDS: Ground Source Heat Pump (GSHP) systems, thermal conductivity measurement, Transient Heat Wire (THW), Infinite Linear Source (ILS), Borehole Heat Exchange (BHE), geothermal backfill material, geothermal grout, industrial by-products, nanosilica.

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

r: Posición radial [m]

t: Tiempo [s]

ΔT : Incremento de temperatura [K]

λ : Conductividad térmica [W/m·K]

α : Difusividad térmica [m²/s]

γ : Constante de Euler (0,5772...)

q: Potencia térmica por unidad de longitud [W/m]

I: Intensidad eléctrica [A]

ΔV : Diferencia de potencial [V]

k: Coeficiente de permeabilidad [m/s]

C: Corrección de calibración del equipo

s_c : Desviación típica del equipo

u: Incertidumbre estándar combinada

K: Factor de cobertura

U: Incertidumbre expandida

THW: Hilo Caliente Transitorio

ILS: Fuente Lineal Infinita

CF: Cenizas de fondo

CLF: Colas de lavadero de fluorita

RCD: Residuos de construcción y demolición

AS: Arena sílicea

CVP: Cenizas volantes de La Pereda

CVA: Cenizas volantes de Aboño

EB: Escoria blanca

MS: Microsílice

NS: Nanosílice

BS: Bentonita sódica

sp: Superplastificante

ACS: Agua caliente sanitaria

EPS: Poliestireno expandido

XPS: Poliestireno extruido

PCB: Placa de circuito impreso

PC: Ordenador personal

PEAD: Polietileno de alta densidad

PVC: Policloruro de vinilo

PMMA: Polimetacrilato de metilo

PRFV: Poliéster reforzado con fibra de vidrio

PP: Polipropileno

TRT: Test de respuesta térmica

RAS: Reacción Álcali-Sílice

CLSM: Material de Baja Resistencia Controlada

PCM: Material de Cambio de Fase

SEM: Microscopia Electrónica de Barrido

XRD: Difracción de Rayos X

XRF: Fluorescencia de Rayos X

ICP-OES: Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma de Acoplamiento Inductivo

AAS: Espectrometría de Absorción Atómica

OMS: Organización Mundial de la Salud

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1	<i>Interés de la tesis.....</i>	<i>- 1 -</i>
1.2	<i>Objetivos.....</i>	<i>- 3 -</i>
1.3	<i>Estructura de la tesis.....</i>	<i>- 4 -</i>
2.	ASPECTOS GENERALES	- 6 -
2.1	<i>Energía geotérmica.....</i>	<i>- 6 -</i>
2.1.1	Definición de energía geotérmica	- 6 -
2.1.2	Gradiente geotérmico	- 7 -
2.1.3	Recursos geotérmicos	- 7 -
2.1.4	Energía geotérmica de muy baja temperatura	- 8 -
2.1.5	Situación de la energía geotérmica en España.....	- 19 -
2.1.6	Situación de la energía geotérmica en Asturias.....	- 20 -
2.2	<i>Transferencia de calor.....</i>	<i>- 20 -</i>
2.2.1	Mecanismos de transferencia de calor	- 20 -
2.3	<i>Propiedades térmicas.....</i>	<i>- 23 -</i>
2.3.1	Conductividad térmica	- 23 -
2.3.2	Capacidad calorífica volumétrica	- 25 -
2.3.3	Difusividad térmica	- 26 -
2.3.4	Dilatación térmica	- 26 -
2.4	<i>Métodos de medida de la conductividad térmica.....</i>	<i>- 27 -</i>
2.4.1	Métodos más utilizados comercialmente	- 28 -

2.4.2	Método del Hilo Caliente Transitorio (THW).....	- 29 -
2.5	<i>Rellenos geotérmicos</i>	- 31 -
2.5.1	Propiedades físicas y mecánicas de los morteros geotérmicos	- 33 -
2.5.2	Componentes utilizados en los rellenos geotérmicos.....	- 35 -
2.5.3	Los tipos de rellenos geotérmicos más utilizados	- 42 -
<hr/>		
3.	REVISIÓN DEL “ESTADO DEL ARTE”	- 43 -
3.1	<i>Métodos de medida de la conductividad térmica</i>	- 43 -
3.1.1	Métodos estacionarios.....	- 44 -
3.1.2	Métodos transitorios.....	- 47 -
3.2	<i>El método del Hilo Caliente Transitorio (THW)</i>	- 50 -
3.2.1	Características del método THW y equipos de medida	- 51 -
3.3	<i>Rellenos geotérmicos</i>	- 54 -
3.3.1	Propiedades de los rellenos geotérmicos	- 55 -
3.3.2	Resistencia térmica de contacto en los sondeos geotérmicos. Retracción	- 59 -
3.3.3	Funciones y características de los rellenos geotérmicos	- 60 -
3.3.4	Rellenos utilizados en los sondeos geotérmicos	- 62 -
3.3.5	Los morteros geotérmicos comerciales	- 66 -
<hr/>		
4.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	- 68 -
4.1	<i>Desarrollo del equipo de medida de la conductividad térmica</i>	- 69 -
4.1.1	Fundamento matemático. Modelo de la Fuente Lineal Infinita (ILS).....	- 70 -
4.1.2	Planteamiento del problema	- 74 -
4.1.3	Fórmula de aplicación	- 74 -
4.1.4	Implementación de la solución	- 74 -

4.1.5	Aspecto constructivo del equipo MCT. Parámetros de diseño	- 75 -
4.1.6	Conexión eléctrico del equipo MCT	- 88 -
4.1.7	Características de las muestras utilizadas en el equipo MCT.....	- 89 -
4.1.8	Aspecto operativo del equipo MCT. Cálculo de la conductividad térmica.....	- 89 -
4.1.9	Validación del equipo MCT	- 93 -
4.1.10	Calibración del equipo MCT. Estimación de la incertidumbre de medida	- 106 -
4.2	<i>Desarrollo del mortero geotérmico.....</i>	<i>- 106 -</i>
4.2.1	Materiales	- 107 -
4.2.2	Diseño y fabricación de las muestras	- 115 -
4.2.3	Ficha resumen de las muestras realizadas	- 126 -
4.2.4	Caracterización térmica de los morteros candidatos.....	- 126 -
4.2.5	Caracterización del mortero geotérmico definitivo	- 130 -
<hr/>		
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 152 -
5.1	<i>Desarrollo del equipo de medida de la conductividad térmica.....</i>	<i>- 152 -</i>
5.1.1	Tamaño mínimo de la muestra e intensidad eléctrica apropiada.....	- 154 -
5.1.2	Influencia producida por la ranura y el relleno de la misma	- 158 -
5.1.3	Comparativa de los valores de conductividad térmica de las muestras	- 159 -
5.1.4	Calibración del equipo MCT. Estimación de la incertidumbre de medida	- 159 -
5.1.5	Resumen de las especificaciones técnicas del equipo MCT	- 163 -
5.2	<i>Desarrollo del mortero geotérmico.....</i>	<i>- 164 -</i>
5.2.1	Análisis granulométrico.....	- 164 -
5.2.2	Determinación de la consistencia	- 165 -
5.2.3	Determinación del tiempo de fraguado	- 165 -

5.2.4	Determinación de la exudación	- 165 -
5.2.5	Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta	- 165 -
5.2.6	Determinación de la resistencia a flexión y a compresión	- 166 -
5.2.7	Estudio de la homogeneidad.....	- 167 -
5.2.8	Determinación de la retracción.....	- 168 -
5.2.9	Determinación del coeficiente de permeabilidad.....	- 169 -
5.2.10	Determinación de la adherencia entre el mortero y la tubería	- 169 -
5.2.11	Estudio de la durabilidad	- 170 -
5.2.12	Análisis químico	- 171 -
5.2.13	Análisis mineralógico	- 173 -
5.2.14	Análisis microestructural y microanálisis composicional.....	- 176 -
5.2.15	Impacto medioambiental	- 179 -
5.2.16	Resumen de las características del mortero geotérmico MG 7.....	- 181 -
5.2.17	Comparativa del mortero MG 7 con otros morteros geotérmicos.....	- 182 -
5.2.18	Influencia de la nanosílice en las propiedades del mortero MG 7	- 183 -
<hr/>		
6.	CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	- 184 -
6.1	<i>Conclusiones generales.....</i>	- 184 -
6.2	<i>Futuras líneas de investigación.....</i>	- 186 -
<hr/>		
7.	GLOSARIO	- 188 -
7.1	<i>Morteros.....</i>	- 188 -
7.1	<i>Metrología.....</i>	- 190 -
<hr/>		
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 192 -
8.1	<i>Publicaciones científicas en revistas y congresos.....</i>	- 192 -

8.2	<i>Libros.....</i>	- 200 -
8.3	<i>Otras fuentes (normativa, tesis, guías, informes.....)</i>	- 203 -
8.4	<i>Páginas web.....</i>	- 208 -
<hr/>		
9.	ANEXOS	- 210 -
9.1	<i>ANEXO I. Altium Designer 6.....</i>	- 210 -
9.2	<i>ANEXO II. Diagrama esquemático del registrador de datos.....</i>	- 211 -
9.3	<i>ANEXO III. Arduino.....</i>	- 214 -
9.3.1	<i>Arduino UNO</i>	- 216 -
9.4	<i>ANEXO IV. Código fuente del programa del registrador de datos.....</i>	- 221 -
9.5	<i>ANEXO V. Equipo Shotherm QTM-F1.....</i>	- 229 -
9.6	<i>ANEXO VI. Ensayos realizados durante la validación del equipo MCT.....</i>	- 233 -
9.7	<i>ANEXO VII. Incertidumbre de medida en el equipo MCT.....</i>	- 253 -
9.7.1	<i>Estimación de la incertidumbre de medida</i>	- 254 -
9.8	<i>ANEXO VIII. Ficha resumen de las muestras realizadas.....</i>	- 258 -

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Bomba de calor geotérmica. Esquema de funcionamiento (Fuente: ATECYR, 2012).</i>	_____ - 11 -
<i>Figura 2. Captación geotérmica vertical (Fuente: Llopis y Rodrigo, 2009).</i>	_____ - 15 -
<i>Figura 3. Intercambiadores verticales con tubos en U (Fuente: REHAU).</i>	_____ - 16 -
<i>Figura 4. Elementos de un sondeo geotérmico de muy baja temperatura.</i>	_____ - 18 -
<i>Figura 5. Rugosidad superficial entre las probetas.</i>	_____ - 25 -
<i>Figura 6. Técnica del hilo paralelo.</i>	_____ - 30 -
<i>Figura 7. Propagación del flujo térmico en la muestra.</i>	_____ - 76 -
<i>Figura 8. Esquema en planta del equipo MCT y disposición de la muestra.</i>	_____ - 76 -
<i>Figura 9. Vista general de la unidad de medición.</i>	_____ - 79 -
<i>Figura 10. Vista de la pieza inferior del molde.</i>	_____ - 81 -
<i>Figura 11. Fuente de alimentación TENMA 72-10480 y dos pinzas de cocodrilo.</i>	_____ - 83 -
<i>Figura 12. Registro de datos mediante breadboard conectada a la tarjeta Arduino UNO.</i>	_____ - 84 -
<i>Figura 13. Registro de datos mediante perfboard conectada a la tarjeta Arduino UNO.</i>	_____ - 85 -
<i>Figura 14. Ensayo de conductividad térmica utilizando el registrador de datos inicial.</i>	_____ - 85 -
<i>Figura 15. Vista de la PCB. Componentes principales.</i>	_____ - 87 -
<i>Figura 16. Curva de calentamiento del termopar del elemento de medición.</i>	_____ - 90 -
<i>Figura 17. Balanza de precisión.</i>	_____ - 98 -
<i>Figura 18. Amasadora planetaria.</i>	_____ - 98 -
<i>Figura 19. Molde para cuatro probetas.</i>	_____ - 99 -
<i>Figura 20. Calibración del termopar del elemento de medición.</i>	_____ - 100 -
<i>Figura 21. Recta de calibración del termopar del elemento de medición.</i>	_____ - 100 -

<i>Figura 22. Ensayo de la muestra-patrón MAXIAL 310 en el equipo MCT.</i>	- 102 -
<i>Figura 23 Ranura parcialmente rellena con polvo de la muestra Macizo M5R.</i>	- 103 -
<i>Figura 24. Ensayo de la conductividad térmica de la muestra M 03 con el equipo comercial.</i>	- 104 -
<i>Figura 25. Ensayo de la conductividad térmica de la muestra M 02 con el equipo MCT.</i>	- 105 -
<i>Figura 26. Mortero geotérmico seco MG 7.</i>	- 106 -
<i>Figura 27. Áridos utilizados en las muestras.</i>	- 110 -
<i>Figura 28. Equipo de difracción láser para el ensayo granulométrico de CVP, CVA, EB y MS.</i>	- 114 -
<i>Figura 29. a) Aparato de Vicat manual. b) Penetrómetro de bolsillo.</i>	- 116 -
<i>Figura 30. Vista general de las muestras realizadas.</i>	- 126 -
<i>Figura 31. Morteros geotérmicos candidatos.</i>	- 127 -
<i>Figura 32. Intervalos de confianza de la conductividad térmica de los 7 morteros candidatos.</i>	- 129 -
<i>Figura 33. Conductividad térmica de MG 4, MG 5, MG 6 y MG 7 y porcentaje de árido artificial.</i>	- 129 -
<i>Figura 34. Tamizadora electromagnética con la columna de tamices.</i>	- 131 -
<i>Figura 35. a) Mesa de sacudidas y molde troncocónico. b) Realización del ensayo.</i>	- 131 -
<i>Figura 36. Aparato de Vicat automático durante el ensayo.</i>	- 132 -
<i>Figura 37. Ensayo de exudación del mortero MG 7 fresco.</i>	- 133 -
<i>Figura 38. Balanza de precisión y recipiente para determinar la densidad aparente del MG 7.</i>	- 133 -
<i>Figura 39. Balanza de precisión y pesada hidrostática de la probeta de MG 7.</i>	- 134 -
<i>Figura 40. Máquina universal de ensayos.</i>	- 135 -
<i>Figura 41. Llenado del tubo de PVC.</i>	- 136 -
<i>Figura 42. Corte de la probeta.</i>	- 136 -
<i>Figura 43. Ensayo de medida de la retracción lineal con el comparador de longitud.</i>	- 137 -
<i>Figura 44. Probeta y material accesorio.</i>	- 138 -

<i>Figura 45. a) Ensayo de permeabilidad. b) Célula de metacrilato con la probeta.</i>	_____	- 138 -
<i>Figura 46. a) Tubos. b) Montaje dentro del recipiente con agua.</i>	_____	- 139 -
<i>Figura 47. Conjunto mortero-tubería.</i>	_____	- 140 -
<i>Figura 48. Ensayo de adherencia en la prensa de 100 kN.</i>	_____	- 140 -
<i>Figura 49. Probetas sumergidas en el baño termostático durante el ciclo de hielo-deshielo.</i>	_____	- 142 -
<i>Figura 50. Ensayo de resistencia a flexión para el estudio de durabilidad del mortero.</i>	_____	- 142 -
<i>Figura 51. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda.</i>	_____	- 143 -
<i>Figura 52. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva.</i>	_____	- 144 -
<i>Figura 53. Difractómetro de rayos X.</i>	_____	- 145 -
<i>Figura 54. Metalizador de oro.</i>	_____	- 146 -
<i>Figura 55. Microscopio electrónico de barrido con microanalizador EDX.</i>	_____	- 147 -
<i>Figura 56. Medición con el pH-metro.</i>	_____	- 149 -
<i>Figura 57. Medición con el conductímetro.</i>	_____	- 149 -
<i>Figura 58. Calibración del turbidímetro.</i>	_____	- 150 -
<i>Figura 59. Espectrómetro de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo.</i>	_____	- 151 -
<i>Figura 60. Analizador de mercurio.</i>	_____	- 151 -
<i>Figura 61. Gráfica temperatura-tiempo. Muestra Skamol SM-65.</i>	_____	- 153 -
<i>Figura 62. Curva de calentamiento en escala semilogarítmica. Muestra Skamol SM-65.</i>	_____	- 153 -
<i>Figura 63. Recta de regresión. Muestra Skamol SM-65.</i>	_____	- 154 -
<i>Figura 64. Influencia de la intensidad eléctrica al medir la conductividad térmica.</i>	_____	- 155 -
<i>Figura 65. Variación de las curvas de calentamiento en función de la conductividad térmica.</i>	_____	- 156 -
<i>Figura 66. Gráfico para obtener la corrección de calibración en el equipo MCT.</i>	_____	- 162 -
<i>Figura 67. Gráfico para obtener la incertidumbre expandida con el equipo MCT.</i>	_____	- 162 -

<i>Figura 68. Curva granulométrica del mortero MG 7 y parábola de Fuller para 2 mm.</i>	_____	- 164 -
<i>Figura 69. Vista general de la sección de la probeta cilíndrica.</i>	_____	- 167 -
<i>Figura 70. Vista de detalle de la sección de la probeta cilíndrica.</i>	_____	- 168 -
<i>Figura 71. Resultados obtenidos durante el ensayo de retracción lineal del mortero MG 7.</i>	_____	- 168 -
<i>Figura 72. Comparativa de los resultados de resistencia mecánica del mortero MG 7.</i>	_____	- 171 -
<i>Figura 73. Difractograma del mortero MG 7 (CH: portlandita, Q: cuarzo, A: alita, C: calcita).</i>	_____	- 176 -
<i>Figura 74. Micrografía del mortero MG 7 endurecido. Gel C-S-H y portlandita (CH).</i>	_____	- 177 -
<i>Figura 75. Micrografía del mortero MG 7 endurecido. Matriz y partícula de arena silícea.</i>	_____	- 177 -
<i>Figura 76. Micrografía del mortero MG 7 endurecido. Pequeños cristales de pirita.</i>	_____	- 178 -
<i>Figura 77. Espectro de energía de la pirita, obtenido mediante EDX.</i>	_____	- 178 -
<i>Figura 78. Sistema de alimentación del registrador de datos.</i>	_____	- 211 -
<i>Figura 79. Sistema de almacenamiento del registrador de datos.</i>	_____	- 211 -
<i>Figura 80. Microcontrolador ATmega328P.</i>	_____	- 212 -
<i>Figura 81. RTC DS1337.</i>	_____	- 212 -
<i>Figura 82. Amplificador AD595AQ.</i>	_____	- 213 -
<i>Figura 83. Conversor A/D ADS1115.</i>	_____	- 213 -
<i>Figura 84. Tarjeta Arduino UNO, versión R3.</i>	_____	- 217 -
<i>Figura 85. Componentes del equipo Shotherm QTM-F1.</i>	_____	- 230 -
<i>Figura 86. Vista en planta de la probeta inferior y el elemento de medida.</i>	_____	- 230 -

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Conductividad térmica del terreno (Fuente: Sanner, 2011; ATECYR, 2012).</i>	- 24 -
<i>Tabla 2. Rellenos geotérmicos típicos (Fuente: Hellström, 2011; Creus Solé, 2008).</i>	- 24 -
<i>Tabla 3. Características de los métodos de medida más utilizados comercialmente.</i>	- 29 -
<i>Tabla 4. Características del hilo de calentamiento (Fuente: VDM Metals).</i>	- 77 -
<i>Tabla 5. Características del termopar tipo K (Fuente: OMEGA Engineering).</i>	- 78 -
<i>Tabla 6. Características de la placa dieléctrica rígida (Fuente: PH Pailamilla e Hijos).</i>	- 80 -
<i>Tabla 7. Características de la plancha de XPS (Fuente: BASF).</i>	- 82 -
<i>Tabla 8. Características de la fuente regulable TENMA 72-10480 (Fuente: Farnell).</i>	- 83 -
<i>Tabla 9. Características del polímetro UNIT-T (Fuente: Manual de usuario).</i>	- 88 -
<i>Tabla 10. Muestras-patrón utilizadas en la validación.</i>	- 94 -
<i>Tabla 11. Características de Skamol SM-65 (Fuente: Skamol A/S).</i>	- 94 -
<i>Tabla 12. Características de Macizo rústico M5R (Fuente: Cerámica La Espina).</i>	- 95 -
<i>Tabla 13. Características de MAXIAL 310 (Fuente: RHI).</i>	- 95 -
<i>Tabla 14. Características de CN-90BA (Fuente: Cerámica del Nalón).</i>	- 95 -
<i>Tabla 15. Características del aditivo RHEOBUILD (Fuente: BASF).</i>	- 96 -
<i>Tabla 16. Nombre y materiales de las muestras de relleno geotérmico de uso común.</i>	- 97 -
<i>Tabla 17. Nombre y dosificación en peso de las muestras de relleno geotérmico de uso común.</i>	- 97 -
<i>Tabla 18. Características de la pasta térmica (Fuente: MG Chemicals).</i>	- 103 -
<i>Tabla 19. Composición química porcentual del cemento (Fuente: Masaveu).</i>	- 108 -
<i>Tabla 20. Composición química porcentual de la bentonita sódica (Fuente: Minersa).</i>	- 108 -
<i>Tabla 21. Composición química porcentual de la nanosílice (Fuente: Evonik Industries).</i>	- 108 -

Tabla 22. Composición química porcentual de las colas de lavadero de fluorita (Fuente: Minersa).	- 110 -
Tabla 23. Composición química porcentual de la escoria blanca (Fuente: ArcelorMittal).	_____ - 111 -
Tabla 24. Composición química porcentual de las cenizas (Fuente: EDP y Hunosa).	_____ - 111 -
Tabla 25. Composición química porcentual de la microsílice (Fuente: FerroAtlántica).	_____ - 112 -
Tabla 26. Composición química porcentual de los RCD (Fuente: Reciclajes de Santiago S.L.).	_____ - 112 -
Tabla 27. Composición química porcentual de la arena sílicea (Fuente: Cantera Grado S.L.).	_____ - 112 -
Tabla 28. Características del aditivo MasterCast 205 MA (Fuente: Master Builders Solutions).	___ - 113 -
Tabla 29. Distribución granulométrica de CF, CLF, RCD y AS.	_____ - 114 -
Tabla 30. Distribución granulométrica de CVP, CVA, EB y MS.	_____ - 115 -
Tabla 31. Nombre y componentes de las mezclas iniciales.	_____ - 118 -
Tabla 32. Nombre y dosificación de las mezclas iniciales.	_____ - 119 -
Tabla 33. Inspección visual de las mezclas iniciales.	_____ - 120 -
Tabla 34. Valores numéricos y valoración final de las mezclas iniciales.	_____ - 121 -
Tabla 35. Nombre y materiales de los morteros candidatos.	_____ - 123 -
Tabla 36. Nombre y dosificación de los morteros candidatos.	_____ - 124 -
Tabla 37. Inspección visual de los morteros candidatos.	_____ - 125 -
Tabla 38. Valores numéricos y valoración final de los morteros candidatos.	_____ - 125 -
Tabla 39. Conductividad térmica, corrección de calibración e incertidumbre expandida.	_____ - 128 -
Tabla 40. Ensayos con el equipo MCT sobre las muestras-patrón.	_____ - 157 -
Tabla 41. Tamaño mínimo de la muestra e Intensidad eléctrica apropiada en el equipo MCT.	___ - 158 -
Tabla 42. Ensayos con el equipo MCT sobre la muestra-patrón Macizo M5R usando relleno.	___ - 158 -
Tabla 43. Medidas de conductividad térmica y desviaciones obtenidas.	_____ - 159 -
Tabla 44. Calibración del equipo MCT. Muestras-patrón y valores medidos.	_____ - 160 -

Tabla 45. Calibración del equipo MCT. Resultados. _____	- 161 -
Tabla 46. Especificaciones técnicas del equipo MCT. _____	- 163 -
Tabla 47. Valores porcentuales de exudación del mortero MG 7. _____	- 165 -
Tabla 48. Valores del mortero MG 7 medidos en la balanza de precisión. _____	- 166 -
Tabla 49. Resultados de resistencia mecánica del mortero MG 7. _____	- 166 -
Tabla 50. Peso seco al inicio y al final de los ensayos de durabilidad del mortero MG 7. _____	- 170 -
Tabla 51. Elementos mayoritarios del mortero geotérmico, en % en peso de óxidos. _____	- 172 -
Tabla 52. Elementos minoritarios y traza del mortero geotérmico, en mg/kg. _____	- 172 -
Tabla 53. Fases cristalinas del mortero MG 7 a los 28 días. _____	- 173 -
Tabla 54. Lista de picos de difracción del mortero MG 7. _____	- 174 -
Tabla 55. Valor de pH del eluato recogido a los 3, 7, 30 y 60 días. _____	- 179 -
Tabla 56. Conductividad eléctrica del eluato recogido a los 3, 7, 30 y 60 días. _____	- 179 -
Tabla 57. Concentración de los elementos lixiviados a los 60 días, en $\mu\text{g/l}$. _____	- 180 -
Tabla 58. Valores máximos establecidos, en $\mu\text{g/l}$. _____	- 181 -
Tabla 59. Características del mortero geotérmico MG 7. _____	- 182 -
Tabla 60. Comparación de las propiedades del mortero MG 7 con otros morteros geotérmicos. _____	- 183 -
Tabla 61. Resultados obtenidos con nanosílice (MG 7) y sin nanosílice (MG 8). _____	- 183 -
Tabla 62. Características de la tarjeta Arduino UNO, versión R3 (Fuente: Arduino). _____	- 217 -
Tabla 63. Especificaciones técnicas (Fuente: Manual del equipo Shotherm QTM-F1). _____	- 231 -
Tabla 64. Intensidad eléctrica de salida (Fuente: Manual del equipo Shotherm QTM-F1). _____	- 232 -
Tabla 65. Tamaño mínimo de las muestras (Fuente: Manual del equipo Shotherm QTM-F1). _____	- 232 -

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad actual demanda cada vez más la utilización de las energías renovables con el objeto de conseguir un desarrollo sostenible. La política energética, tanto europea como nacional, debe posibilitar, facilitar e incluso obligar a que cada vez haya una mayor utilización de fuentes de energía renovables, para conseguir reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, según los compromisos adquiridos con la firma del protocolo de Kioto y el acuerdo de París.

La energía geotérmica, al igual que el resto de las energías renovables, ha experimentado un gran desarrollo en los últimos tiempos, en especial la denominada geotermia de muy baja temperatura. De este modo, hoy en día se plantea como una buena alternativa a los recursos energéticos tradicionales y una de las tecnologías que tendrá mayor potencial en los próximos años. El aprovechamiento geotérmico de muy baja temperatura se realiza en la mayoría de los casos mediante sondeos geotérmicos. El elemento más importante de estos sondeos es el relleno geotérmico, que es el material que se introduce en los sondeos geotérmicos. Para un diseño óptimo de estas instalaciones geotérmicas de muy baja temperatura se debe conocer la conductividad térmica del relleno geotérmico utilizado. Los rellenos geotérmicos formados por la mezcla de cemento, áridos finos y/o adiciones se conocen como morteros geotérmicos.

Por otra parte, el aprovechamiento y uso de subproductos y/o residuos industriales es también un imperativo en la sociedad de hoy en día, la cual cada vez más fomenta y promueve la valorización de estos materiales. Por lo tanto, parece obvia la necesidad de encontrar usos encaminados a la reutilización de los mismos, minimizando en lo posible que su destino final sea un vertedero y reduciendo así el impacto medioambiental.

Además, la utilización de nanopartículas en la industria y la construcción ha experimentado un importante desarrollo en la última década. El empleo de estos nanomateriales ha demostrado una considerable mejora en las propiedades de los materiales.

La tesis que se presenta surge de una doble necesidad. Por una parte, la de incorporar residuos de la industria y nanopartículas en los rellenos geotérmicos. Por otra parte, la de poder determinar la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos utilizando un equipo de medida propio, especialmente diseñado para tal fin.

1.1 Interés de la tesis

Es importante destacar que en los últimos años ha comenzado en España el aprovechamiento geotérmico de muy baja temperatura mediante bomba de calor, muy habituales en otros países europeos. Por tanto, en los años venideros se espera un importante auge de esta tecnología, debido a que cada día es mayor el interés que despierta en nuestro territorio.

El diseño óptimo de una instalación geotérmica vertical de muy baja temperatura pasa por utilizar un relleno geotérmico con unas propiedades térmicas adecuadas. Para el cálculo de dicha instalación se debe conocer la conductividad térmica del relleno geotérmico utilizado. Esta propiedad térmica depende de muchos parámetros, siendo compleja y difícil de medir.

Existen diversos equipos comerciales para medir la conductividad térmica en laboratorio, pero con unos costes elevados y en algunos casos grandes dimensiones y peso. De igual modo, en las últimas décadas, otros investigadores han desarrollado sus propios equipos de medida, pero utilizando dispositivos complejos y en ocasiones costosos. No obstante, en la literatura científica no se ha encontrado ningún equipo de laboratorio expresamente desarrollado para medir la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos.

Por todo ello, en la presente tesis se pretende desarrollar un equipo, especialmente diseñado para medir en laboratorio la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos, que además sea fiable, ligero, de fácil construcción y manejo, económico, exacto y preciso. Este equipo se basa en el método del Hilo Caliente Transitorio (THW), cuyo fundamento matemático es el modelo de la Fuente Lineal Infinita (ILS).

Igualmente, están disponibles en el mercado varios morteros geotérmicos comerciales en los cuales se utilizan áridos naturales procedentes de explotaciones mineras. Sin embargo, el aprovechamiento de subproductos y/o residuos industriales en la fabricación de los morteros geotérmicos trae consigo beneficios no solo económicos, sino también medioambientales.

Además, se ha observado que, en los morteros geotérmicos desarrollados hasta ahora por otros equipos de investigación, no se ha hecho uso de dos tipos de residuos industriales muy abundantes y sin apenas aplicación comercial, como son las colas de lavadero de minerales no metálicos y la escoria blanca.

Por otra parte, desde hace unos años la nanotecnología ha tenido un creciente desarrollo en la industria de la construcción. La adición en los hormigones de nanopartículas, tales como nanoalúmina, nanotitanio, nanohierro y sobre todo nanosílice, ha sido muy investigada en los últimos años. Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura científica ninguna referencia sobre el empleo de nanosílice en los morteros geotérmicos.

Por los motivos expuestos, se pretende en esta tesis desarrollar un mortero geotérmico de base cemento en el que se use nanosílice y que esté constituido por un importante porcentaje de residuos industriales, destacando las colas de lavadero de fluorita y la escoria blanca, entre otros. Además, este mortero geotérmico debe tener unas propiedades mecánicas, hidráulicas y térmicas comparables o superiores a las de los rellenos geotérmicos comerciales. El elemento innovador más destacado es el uso de nanosílice, la cual modifica favorablemente las propiedades del mortero geotérmico.

1.2 Objetivos

Son dos los objetivos principales de la tesis. Por un lado, desarrollar un equipo de medida de la conductividad térmica de rellenos geotérmicos y por otro lado desarrollar un mortero geotérmico en el que se utilicen residuos industriales y nanopartículas.

Para conseguir el primer objetivo principal de la tesis se proponen los siguientes tres objetivos secundarios:

1. Diseñar y construir el equipo de medida. Hay que tener en cuenta que las hipótesis, condiciones y aproximación del modelo de la Fuente Lineal Infinita imponen unas exigencias al equipo, a la forma y dimensiones de las muestras, así como a la ejecución de las medidas.
2. Validar el equipo de medida, por medio de ensayos realizados sobre muestras-patrón y también ensayos realizados sobre muestras de rellenos geotérmicos de uso común, utilizando en este caso el equipo de medida desarrollado y un equipo comercial.
3. Calibrar el equipo de medida utilizando muestras-patrón. El objetivo es determinar la corrección de calibración del equipo y estimar la incertidumbre de las mediciones.

Por otro lado, para la consecución del segundo objetivo principal se proponen los siguientes tres objetivos secundarios:

1. Seleccionar los materiales y preparar las mezclas iniciales, con el fin de observar la influencia de los distintos componentes y dosificaciones en el comportamiento de las mezclas. Tras el estudio de estas mezclas iniciales se preparan otras muestras, que constituyen los morteros geotérmicos candidatos.
2. Calcular la conductividad térmica de los morteros geotérmicos candidatos, utilizando el equipo de medida desarrollado en esta tesis. Finalmente, en base a los valores de conductividad térmica medidos, se decide cuál es el mortero geotérmico definitivo al cual se le realizarán los correspondientes ensayos físicos, mecánicos y químicos, para así lograr su completa caracterización.
3. Realizar la caracterización del mortero geotérmico definitivo, para lo cual se considera necesario:
 - ✓ Obtener la distribución granulométrica del mortero geotérmico.
 - ✓ Medir la consistencia, exudación, densidad, tiempo de fraguado, resistencia mecánica y retracción del mortero geotérmico.

- ✓ Determinar el coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica) y la durabilidad del mortero geotérmico.
- ✓ Comprobar la homogeneidad del mortero geotérmico.
- ✓ Diseñar un experimento para medir la adherencia del mortero geotérmico a la tubería.
- ✓ Analizar la compatibilidad del mortero con las aguas subterráneas y con los terrenos circundantes, de manera que no produzca ningún tipo de impacto medioambiental.
- ✓ Analizar la composición química, las especies minerales y la microestructura del mortero geotérmico.

Por tanto, para la consecución del segundo objetivo de la tesis se han realizado una serie de muestras y ensayos con el objeto de conocer el comportamiento del mortero geotérmico, no sólo desde un punto de vista térmico, sino también mecánico, hidráulico y medioambiental. Se considera también importante la disponibilidad y coste económico de los componentes que forman el mortero geotérmico.

1.3 Estructura de la tesis

La presente tesis se encuentra estructurada en cinco capítulos principales.

- En el capítulo Aspectos Generales se provee información básica sobre el tema de la tesis. De este modo, se comienza definiendo la energía geotérmica y detallando los principales aspectos relacionados con la misma, tales como el gradiente geotérmico, los tipos de recursos geotérmicos y técnicas de aprovechamiento, la energía geotérmica de muy baja temperatura y la situación de la energía geotérmica en España y en Asturias. A continuación, se describen los mecanismos de transferencia de calor, las propiedades térmicas, los tipos de métodos de medida de la conductividad térmica, así como las propiedades, componentes y tipos de rellenos geotérmicos.
- En el capítulo Revisión del “estado del arte”, se realiza un extenso estudio de los principales métodos de medida de la conductividad térmica, del método THW y de los rellenos geotérmicos. Para ello, se lleva a cabo la búsqueda de información publicada en la literatura técnica y en agencias y organismos oficiales.
- En el capítulo Procedimiento Experimental se comienza exponiendo el fundamento matemático del modelo de la Fuente Lineal Infinita. A continuación, se describe el proceso de desarrollo del equipo de medida de la conductividad térmica, desde el diseño y construcción hasta la validación y posterior calibración del mismo. También

se describen todos los materiales, equipos, normativa y ensayos que se utilizan para desarrollar el mortero geotérmico definitivo.

- En el capítulo Resultados y Discusión se plasman los resultados obtenidos y se analiza, evalúa, discute e interpreta toda la información obtenida durante la realización de la tesis. En lo relativo al equipo de medida desarrollado se determina, en función de la conductividad térmica, cuál es el tamaño mínimo de la muestra y la intensidad eléctrica apropiada. Además, se evalúa la influencia que puede tener la realización en la muestra de una ranura rellena con pasta térmica y con polvo del mismo material que la muestra. También se determina la corrección de calibración del equipo desarrollado y la estimación de la incertidumbre de medida. Respecto al mortero geotérmico desarrollado se detallan los valores obtenidos durante los ensayos de caracterización, comparándolos en su caso con los de la normativa de referencia y con otros morteros geotérmicos, tanto comerciales como desarrollados por otros equipos investigadores. Además, se determina el coste del mortero desarrollado.
- Finalmente, se exponen las Conclusiones Generales más relevantes que se derivan y las Futuras Líneas de Investigación que permiten seguir trabajando en la mejora del equipo de medida y del mortero geotérmico desarrollado, y que no han podido abordarse en el presente trabajo de investigación.

2. ASPECTOS GENERALES

Se presenta este capítulo con el fin de exponer ciertos aspectos básicos del ámbito de la tesis que, aunque tengan un carácter general, se ha considerado oportuno incluir debido a que la tesis traslapa dos campos de conocimiento independientes entre sí, aunque tienen un nexo común que es la energía geotérmica. Estos dos campos son la medida de la conductividad térmica y los rellenos geotérmicos.

2.1 Energía geotérmica

A pesar de que en el mundo, a día de hoy, el sector de los combustibles fósiles sigue siendo líder en cuanto a consumo primario de energía, los primeros años del siglo XXI muestran una clara tendencia por el uso de la energía geotérmica ([Marco y Scarpellini, 2013](#)).

En el ámbito europeo, la aprobación en junio de 2009 de la nueva Directiva Europea de Energías Renovables –[Directiva 2009/28/CE](#)– supone un importante respaldo al desarrollo de la energía a partir de fuentes renovables en general, y de la energía geotérmica en particular.

La energía geotérmica se encuentra bajo la superficie terrestre en forma de calor y puede apreciarse su manifestación en los volcanes, las aguas termales, las fumarolas y los géiseres ([Llopis y Rodrigo, 2009](#)). El origen del calor interno de la Tierra proviene del calor inicial que se liberó durante la formación del planeta, hace aproximadamente 4.600 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie, del calor liberado en la desintegración de los isótopos radiactivos, principalmente U-235, U-238, Th-232 y K-40, de los movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra, sobre todo entre el manto y el núcleo, y del calor latente de cristalización del núcleo externo ([Pous y Jutglar, 2004](#)).

Según se muestra en [Bertani \(2016\)](#), en el año 2015 había 26 países en los que se aprovecha la energía geotérmica para producir electricidad, destacando EE.UU, Filipinas, Indonesia, México, Nueva Zelanda, Italia, Islandia, Kenia y Japón, que en conjunto suponen el 90 % de la potencia total instalada, que asciende a 12,7 GW eléctricos. Por su parte, España cuenta con una estructura geológica propicia para el aprovechamiento de la energía geotérmica, especialmente las islas de Tenerife, Lanzarote y la Palma, pues disponen de recursos geotérmicos de alta temperatura en su subsuelo ([IDAE e IGME, 2008](#)).

2.1.1 Definición de energía geotérmica

La energía geotérmica es, en su sentido más amplio, la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre. Geotermia es una palabra de origen griego, ya que está compuesta por geo (del griego γη) que significa tierra y

termia (del griego θερμη) que significa calor. En la [Directiva 2009/28/CE](#), se define la energía geotérmica como la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida. Por su parte, en la Declaración de Bruselas de 2009 del Consejo Europeo de Energía Geotérmica ([EGEC](#)), se establece que la energía geotérmica es una fuente de energía sostenible, renovable, casi infinita, que proporciona calor y electricidad las 24 horas del día a lo largo de todo el año.

La energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

2.1.2 Gradiente geotérmico

Es el incremento de temperatura registrado al profundizar desde la capa más externa de la Tierra hacia las partes interiores de la misma. El gradiente geotérmico de la mayor parte del planeta es de unos 30 °C cada 1.000 metros de profundidad. Sin embargo, hay regiones de la Tierra en las cuales el gradiente geotérmico es muy diferente al valor promedio, así en aquellas zonas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante es rellenada con sedimentos, el gradiente geotérmico puede ser incluso menor que 1 °C/km. En cambio, según la [Asociación Internacional de Geotermia](#) hay zonas activas en las que el gradiente es más de diez veces el valor promedio.

2.1.3 Recursos geotérmicos

Se define el recurso geotérmico como la fracción de la energía geotérmica que puede ser aprovechada de forma técnica y económicamente viable.

Según la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia ([GEOPLAT](#)), Los recursos geotérmicos se clasifican en:

- Recursos geotérmicos de alta temperatura (T > 150 °C). Son los que se encuentran principalmente en zonas con gradientes geotérmicos elevados y se sitúan a profundidades muy variables (son frecuentes entre 1.500 y 3.000 m). Están constituidos por vapor seco o por una mezcla de agua y vapor.
- Recursos geotérmicos de media temperatura (T: 100-150 °C). Estos recursos pueden localizarse en zonas con un gradiente geotérmico elevado a profundidades inferiores a los 2.000 m, y en cuencas sedimentarias a profundidades entre los 3.000 y 4.000 m. Su temperatura permite el aprovechamiento eléctrico y también pueden aprovecharse para uso térmico.

- Recursos geotérmicos de baja temperatura (T: 30-100 °C). Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.500 y 2.500 m, o a profundidades inferiores a los 1.000 m en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Los fluidos geotérmicos en muy raras ocasiones se utilizan directamente, lo más frecuente es el aprovechamiento de su energía mediante intercambiadores y/o bombas de calor.
- Recursos geotérmicos de muy baja temperatura (T < 30 °C). Las temperaturas de estos recursos suelen acercarse a la media anual del lugar donde se captan. Corresponden a la energía térmica almacenada en las aguas subterráneas, incluidas las provenientes de labores mineras y túneles, y en el subsuelo poco profundo (normalmente, a menos de 150 m). Su aplicación son los usos directos del calor con la utilización de una bomba de calor.

2.1.4 Energía geotérmica de muy baja temperatura

La mayoría de los sistemas tradicionales de calefacción utilizan carbón, gas natural, butano, propano, gasóleo o queroseno. De esta forma se tiene una baja eficiencia energética y una considerable emisión de CO₂, además de otros gases contaminantes, como NO_x y SO₂. Sin embargo, la energía geotérmica de muy baja temperatura es una fuente de energía eficiente y limpia. Además, actualmente, la energía geotérmica de muy baja temperatura se encuentra en una situación de madurez tecnológica ([Gil García, 2008](#)).

La energía geotérmica de muy baja temperatura, mediante el uso de una bomba de calor, aprovecha la estabilidad térmica del terreno o de las aguas (lagos, ríos, estanques...) para proporcionar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS) en el ámbito de la edificación, así como en actividades agrícolas o industriales. Una de las características más destacables de la energía geotérmica de muy baja temperatura es que es susceptible de ser utilizada en cualquier parte del mundo, mientras que las restantes fuentes de energía solo son de aplicación donde se localiza el recurso (sol, viento...).

La superficie terrestre resulta un medio muy apropiado para el almacenamiento de energía térmica, dada su estabilidad frente a los cambios térmicos estacionales. De hecho, hasta una profundidad de unos 20 m, la temperatura del subsuelo se mantiene, en la mayoría de los lugares prácticamente constante, e igual a unos 10 °C en el centro de Europa y unos 15 °C en España, incrementándose a partir de ahí aproximadamente 3 °C cada 100 m de profundidad, valor correspondiente al denominado gradiente geotérmico.

Las principales ventajas de la energía geotérmica de muy baja temperatura son:

- Se eliminan todas las unidades exteriores con lo que el sistema está protegido contra la corrosión, robo y vandalismo. La bomba de calor, así como toda la valvulería, instrumentación y equipos necesarios (circuladora, vaso de expansión...) se ubicarán dentro del edificio.
- El espacio exterior ocupado por las tuberías en contacto con la tierra queda cubierto por el terreno, evitando cualquier impacto visual.
- Estos sistemas son muy eficientes. En consecuencia, tienen un ahorro económico muy importante, lo que trae consigo un período de retorno de la inversión inicial en un plazo de tiempo relativamente pequeño.
- Posibilita la utilización de recursos energéticos locales.
- Es una energía disponible todas las horas del año.
- No se producen emisiones contaminantes.
- Tienen un funcionamiento sin peligros, pues no hay depósito de combustible, ni combustión y por tanto no hay humos, ni polvo ni hollín, ni chimeneas, ni necesidad de protecciones específicas contra el fuego.
- Se consigue un alto confort térmico, debido a la posibilidad de utilización en las instalaciones de suelo radiante, y un alto confort acústico, pues el nivel sonoro de la bomba de calor geotérmica es bajo.
- Tienen un mantenimiento reducido.
- Es una solución integral, ya que aporta climatización, frío industrial y producción de ACS.

La principal desventaja de la energía geotérmica de muy baja temperatura es el elevado coste de capital, especialmente en configuraciones verticales ([Montaser et al., 2021](#)). A pesar de ello, debido al aumento de la población mundial, la cada vez mayor conciencia medioambiental, el continuo aumento del precio de la energía y la necesaria independencia energética que requieren muchas zonas, se observa en los últimos años un interés creciente por el uso de la energía geotérmica de muy baja temperatura.

Para poder aprovechar estos recursos de muy baja temperatura, asociados siempre a la denominada geotermia somera y presentes a cualquier hora en el subsuelo de cualquier lugar de la Tierra, es necesario hacer uso de una bomba de calor geotérmica.

2.1.4.1 Bomba de calor geotérmica

Las instalaciones de bomba de calor geotérmicas es una tecnología ampliamente difundida en Norteamérica y en la mayoría de los países del Norte y Centro de Europa. Sin embargo, España figura entre los países en que tradicionalmente estos sistemas han tenido más escaso desarrollo, siendo notables las diferencias con Estados Unidos, Canadá, Suecia, Alemania, Suiza o Austria, en los que la bomba de calor geotérmica, ya desde finales de los años 70 ha ido introduciéndose y consolidándose. No obstante, en los últimos años las bombas de calor geotérmicas son cada vez más populares en España ([Pascual Muñoz et al., 2018](#)).

Aunque el uso mayoritario de la bomba de calor geotérmica es la climatización de edificios, cada día tiene más aplicaciones. Así, según [Balbay y Esen \(2010\)](#) hay zonas centroeuropeas en las que las bombas de calor geotérmicas se utilizan para derretir la nieve acumulada sobre el pavimento de las carreteras y puentes.

Contrariamente a lo que ocurre en la naturaleza, en la que el flujo de calor pasa de una temperatura más alta a otra más baja, la bomba de calor es capaz de forzar el flujo de calor en el otro sentido, de más baja temperatura a más alta, utilizando una pequeña cantidad de energía en forma de electricidad o combustible, así pues la bomba de calor geotérmica puede transferir el calor desde las fuentes naturales del entorno a baja temperatura hacia las dependencias interiores que se pretenden climatizar.

En general, una bomba de calor es una máquina termodinámica que transfiere el calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña.

Si la bomba de calor es reversible, podrá realizar también la transferencia de calor en sentido inverso, es decir, desde el recinto que requiere frío hacia el ambiente que se encuentra a temperatura superior, pudiendo entonces trabajar en modo calefacción y también en modo refrigeración. Por tanto, la bomba de calor geotérmica reversible extrae energía térmica del subsuelo en invierno transfiriéndola al interior mientras que en verano extrae el calor del interior y lo transmite al subsuelo (Figura 1).

Los principales elementos que componen una bomba de calor geotérmica son el compresor, el condensador, el dispositivo de expansión y el evaporador, además de una válvula de cuatro vías, en las bombas de calor reversibles. También disponen de toda una serie de componentes adicionales, tales como silenciador, válvula de retención, etc., y de los distintos elementos de seguridad y control, como presostatos y termostatos ([Rey y Velasco, 2005](#)).

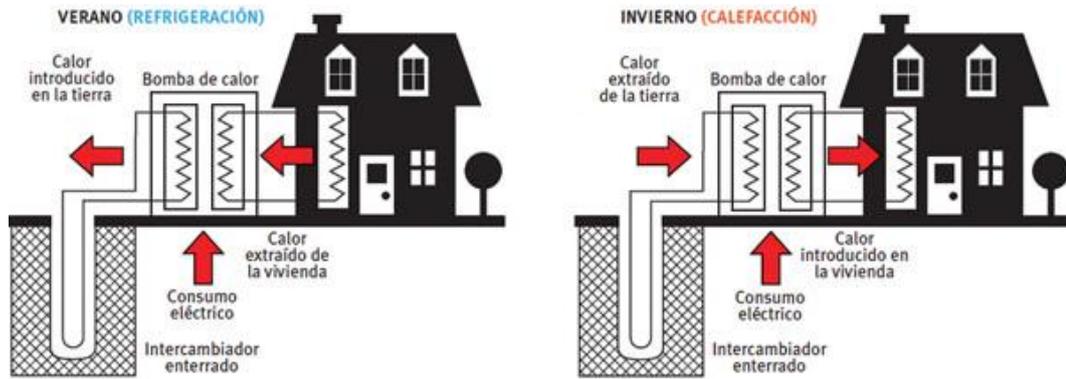


Figura 1. Bomba de calor geotérmica. Esquema de funcionamiento (Fuente: [ATECYR, 2012](#)).

Cuando la bomba de calor opera en modo calefacción, una buena parte del calor que se utiliza en la aplicación es calor extraído indirectamente del Sol que previamente ha sido almacenado por el subsuelo. La parte de calor que proviene del gradiente geotérmico del subsuelo, es decir, del interior de la Tierra, es relativamente pequeña o incluso nula. Tanto es así, que se considera que la energía geotérmica de muy baja temperatura tiene su origen en el Sol ([Aranda y Ortego, 2011](#)).

Las bombas de calor geotérmicas transfieren calor desde el terreno al edificio, invernadero, balneario, proceso industrial, etc., y como, generalmente, el subsuelo posee condiciones de temperatura más favorables que el aire, ello posibilita una menor demanda de energía primaria por parte del compresor. El mejor rendimiento de las bombas de calor geotérmicas se basa, por tanto, en el aprovechamiento del terreno como foco térmico.

A la eficiencia de las bombas de calor se le denomina COP (Coefficient Of Performance). Se define el COP, del ciclo de calefacción o del ciclo de refrigeración, como el cociente entre la energía térmica útil y el trabajo utilizado (la energía necesaria para accionar el compresor y la bomba que mueve el líquido que circula por los tubos enterrados). Al COP del ciclo de refrigeración también se le llama EER (Energy Efficiency Ratio).

El COP de la bomba de calor varía según la temperatura de trabajo, y por tanto según la época del año, es por ello que se define el factor de rendimiento estacional, conocido por las siglas SPF (Seasonal Performance Factor), como el cociente entre la energía térmica aportada durante la estación y la energía térmica consumida durante dicha estación.

En sistemas que operan para calefacción y refrigeración, es necesario tener en cuenta la diferencia entre el calor aportado y extraído del terreno. El calor aportado en el suelo durante el trabajo en modo refrigeración aumenta la temperatura del mismo y contribuye a mejorar la eficiencia del proceso inverso, la calefacción. Así pues, el propio principio de funcionamiento

de las bombas de calor geotérmicas puede verse beneficiado si el equipo tiene doble uso, para calefacción y refrigeración.

Estas bombas de calor geotérmicas pueden utilizarse en los sistemas de climatización “todo agua”, a través de radiadores de baja temperatura, fan coils o suelo radiante. También pueden utilizarse en los sistemas “todo aire”, a través de una UTA (Unidad de Tratamiento de Aire) que conduce el aire hasta las rejillas, difusores o toberas. También en los sistemas “aire-agua”, utilizando inductores. También puede utilizarse en sistemas “todo refrigerante”, utilizando en este caso bombas de calor de expansión directa. De todos los sistemas expuestos, es con el suelo radiante con el que se consiguen los mejores rendimientos.

Las ventajas de las bombas de calor geotérmicas son múltiples: escasez de ruido, ahorro energético, integración arquitectónica, facilidad de mantenimiento y una fuente de energía limpia. De hecho, si la bomba de calor funciona con electricidad producida por una fuente renovable, tal como la energía fotovoltaica o eólica, el impacto al medio ambiente será nulo ya que en ningún momento del ciclo de vida se emitirán partículas ni gases contaminantes.

Además, las bombas de calor con un SPF mayor o igual a 2,5 se consideran una fuente de energía renovable ([Decisión 2013/114/UE](#)). Por otra parte, la bomba de calor geotérmica destaca por su capacidad de complementarse con otras fuentes de energía, principalmente la energía solar térmica.

El uso de la bomba de calor geotérmica contribuye a un modelo energético más sostenible, consiguiendo reducir el impacto ambiental y la independencia energética.

El inconveniente más destacable de las instalaciones con bombas de calor geotérmicas es el elevado coste de la inversión inicial, debido fundamentalmente a la necesidad de realizar excavaciones en el terreno.

2.1.4.2 Sistemas de captación en geotermia de muy baja temperatura

Los sistemas que conectan la bomba de calor geotérmica con el subsuelo, permitiendo la extracción del calor del terreno o su inyección en él, son básicamente, abiertos y cerrados, si bien existen otros tipos que también serán objeto de consideración en el presente apartado.

En los sistemas de lazo o bucle abierto se realiza la captación de un recurso hídrico (acuífero, lago, río...) para intercambiar calor devolviéndolo posteriormente a su origen. Si lo que se aprovecha es un acuífero, estos sistemas se caracterizan porque el fluido caloportador, el agua subterránea, fluye libremente en el subsuelo, y en la mayoría de los casos son necesarios dos sondeos, uno para extraer el agua subterránea y otro para reinyectarla en el mismo acuífero de la que se obtuvo. También es posible la existencia de un solo sondeo en cuyo caso el agua

se vierte a un río, lago, embalse, etc., aunque esto tiene como desventaja el descenso del nivel freático de la zona, definido como el lugar geométrico de los puntos en los que el agua del terreno se encuentra a la presión atmosférica ([Martínez Alfaro et al., 2005](#)).

En estos sistemas de lazo o bucle abierto, el sondeo de captación, equipado con una bomba sumergible, conduce el agua subterránea hasta la bomba de calor, desde donde, una vez cede su energía, se devuelve al acuífero de origen. En algunos casos, por ejemplo, cuando las aguas subterráneas son bastante corrosivas, es necesario colocar un intercambiador de calor, normalmente de placas, para que el fluido termal no deteriore la batería de la bomba de calor.

Con el objeto de evitar el enfriamiento continuo del agua subterránea, los sondeos de producción e inyección deben situarse, respectivamente, aguas arriba y aguas abajo del flujo subterráneo, y a la distancia adecuada. Estos sistemas abiertos están sujetos a importantes restricciones por parte de las administraciones medioambientales y sanitarias, estando su explotación condicionada a una tramitación administrativa compleja y dilatada.

Sin embargo, en los sistemas de lazo o bucle cerrado es un fluido caloportador, agua o, más generalmente, una mezcla de agua con un fluido anticongelante, quien realiza el intercambio térmico. Este fluido caloportador no tiene contacto alguno con el suelo o con el agua freática circundante, de este modo las aguas subterráneas no se ven afectadas, con lo que se superan las posibles restricciones impuestas por la legislación sanitaria y medioambiental. Estos sistemas son muy usados debido a su bajo impacto ambiental, comparado con los sistemas de lazo o bucle abierto.

Según [Allan y Philippacopoulos \(1999\)](#) existe una gran variedad de fluidos anticongelantes: cloruro sódico, cloruro cálcico, etanol, etc.

No obstante, son el etilenglicol y el propilenglicol, cuyas temperaturas de congelación son -13 y -12 °C, respectivamente, las soluciones anticongelantes más usadas hoy día en los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura ([Perales Benito, 2012](#)).

Los sistemas de lazo cerrado, generalmente, se basan en el empleo de tubos enterrados, aunque también pueden ir sumergidos en un lago, río, etc., en cuyo caso el intercambio térmico se realiza con una masa de agua.

Los sistemas enterrados ofrecen la posibilidad de explotar los recursos geotérmicos de muy baja temperatura en las situaciones en que la impermeabilidad del terreno o la profundidad del nivel freático, no permiten aprovechar la energía de las aguas del subsuelo. Por otra parte, según [Florides et al. \(2013\)](#) los tipos básicos de intercambiadores de calor en el terreno, son:

- Horizontales. Estos sistemas son más fáciles de instalar y tienen un coste menor que los sistemas verticales, a pesar de requerir más metros de tubería. Sin embargo, estos sistemas requieren una considerable superficie de terreno, no siempre disponible, y además están sometidos a importantes variaciones de temperatura que afectan en gran medida al rendimiento estacional. Las tuberías horizontales son normalmente de polietileno de alta densidad (PEAD) con un diámetro de 25 a 40 mm e instaladas a una profundidad de 0,60 a 3 m.

Las tuberías se pueden conectar en serie o en paralelo, aunque para solventar los problemas de espacio que se plantean con este tipo de tubos, se han desarrollado otros intercambiadores de calor, tales como el colector Slinky, el cual se basa en la colocación en el terreno de una tubería en espiral, o el colector en zanja, constituido por varias tuberías paralelas y sujetas a las paredes de la zanja.

La fuente de energía térmica captada por los captadores horizontales es la radiación solar. Por lo tanto, es importante no cubrir la superficie del terreno que está sobre la tubería ([Florides y Kalogirou, 2007](#)).

- Verticales. Los sistemas de lazo cerrado con intercambiador de calor vertical (Figura 2) suponen la perforación de sondeos geotérmicos de muy baja temperatura en los que se introducen los tubos por los que circula el fluido caloportador. A estos tubos verticales se les denomina también sondas geotérmicas y suelen ser de PEAD, pues según [Orche García \(2011\)](#) se optimiza la conductividad térmica, el mantenimiento, la facilidad de instalación, el coste, etc.

La fuente de energía térmica captada por las sondas geotérmicas es, en la zona superficial, la radiación solar y, en la zona inferior, el flujo de calor geotérmico, con cierta influencia del agua subterránea circulante, aunque suele ser poco importante en la mayoría de los casos.

Las instalaciones que disponen de bomba de calor acoplada a sistemas de lazo o bucle cerrado con intercambiadores verticales son de dimensiones muy variadas, desde viviendas unifamiliares con un solo intercambiador hasta grandes edificios que requieren campos con un importante número de sondas geotérmicas.

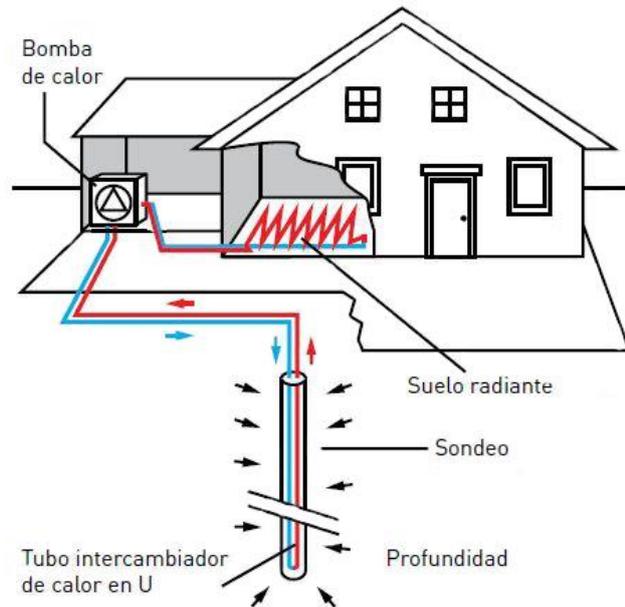


Figura 2. Captación geotérmica vertical (Fuente: [Llopis y Rodrigo, 2009](#)).

Los intercambiadores de calor verticales pueden ser principalmente de dos tipos, a saber:

- **Con tubería en U.** Los intercambiadores verticales de este tipo son los más utilizados en Europa y consisten en uno o dos pares de tubos con diámetros de 32 a 40 mm y unidos en su base mediante un codo de 180°. Según [Hellström \(1998\)](#), en el norte de Europa se utilizan preferiblemente tuberías con un par de tubos mientras que en los países centroeuropeos es más usada la tubería con dos pares de tubos. A su vez, en el caso de que haya dos pares de tubos en U, estos pueden ser paralelos o estar cruzados (Figura 3). [Sanner et al. \(2003\)](#) han estudiado la resistencia térmica del sondeo en función del tipo de tubería y señalan que es, para el mismo material de relleno, un 30 % menor si se utiliza dos pares de tubos, en vez de un par de tubos.
- **Con tubería coaxial.** Este sistema, en su disposición más simple, consta de dos tubos concéntricos con un diámetro exterior de 50 a 63 mm. También existen configuraciones más complejas que incluyen un mayor número de tubos intercambiadores.



Figura 3. Intercambiadores verticales con tubos en U (Fuente: [REHAU](#)).

En los últimos años, diferentes autores han estudiado intercambiadores de calor verticales con tubería helicoidal y han concluido que se pueden conseguir importantes ahorros económicos al reducirse considerablemente la longitud de perforación necesaria ([Sáez Blázquez et al., 2017b](#)).

Por otra parte, cabe destacar dentro de los sistemas verticales, los denominados cimientos termoactivos, en las que se aprovecha la propia cimentación profunda del edificio para ubicar las tuberías de intercambio de calor, captando la energía térmica del terreno. En este caso, embebidos sobre los propios pilotes de la cimentación se sitúan las tuberías geotérmicas. En estos sistemas, también denominados cimientos geotérmicos o energéticos, se inserta, en la totalidad o en una parte de los pilotes, una red de tubos de PEAD, polipropileno (PP) o policloruro de vinilo (PVC), que se conforman como conductos en U y por los que se hace circular en circuito cerrado agua con un anticongelante. Esta tecnología es en la actualidad, debido a su enorme potencial, una de las más empleadas para calentar, refrigerar y dotar de ACS, no sólo viviendas unifamiliares y colectivas, sino edificios públicos. Ofrece, como ventajas, un considerable ahorro de trabajo, al desarrollarse de forma conjunta los proyectos de climatización y de construcción, y de espacio, al situarse todo el circuito de intercambio térmico debajo del edificio a climatizar. Su principal inconveniente es la dificultad que presenta la reparación de los tubos captadores una vez instalado y hormigonado el pilote.

Habría que considerar una tercera categoría, a la que pertenecen los sistemas que no pueden incluirse, estrictamente, como abiertos o cerrados. Serían tanto los pozos canadienses o provenzales, a través de los cuales se hace pasar aire que sirve para climatizar el edificio (calefactando en el primer caso y refrigerando en el segundo), como aquéllos otros sistemas en los que existe cierta diferenciación entre el agua subterránea y el fluido caloportador, pero no hay ninguna barrera entre ellos (por ejemplo, aprovechando las aguas de minas y túneles para su explotación con fines energéticos). Las galerías de las antiguas explotaciones mineras subterráneas proporcionan aguas con un considerable potencial geotérmico, ya que tienen una temperatura casi constante durante todo el año. Cabe citar, como ejemplo, el Proyecto Barredo en Asturias, donde aprovechando las aguas subterráneas que se captan en el Pozo minero Barredo y usando varias bombas de calor se climatiza la Escuela politécnica de Mieres,

el Edificio de Investigación, la sede de la Fundación Asturiana de la Energía, así como el nuevo hospital de Mieres.

2.1.4.3 Sondeos geotérmicos de muy baja temperatura

Un sondeo es una perforación cilíndrica en el terreno. Los sondeos geotérmicos en los que se enmarca la presente tesis, es decir, los de muy baja temperatura, son verticales y tienen, generalmente, una profundidad de 50-150 m y un diámetro de 100-150 mm ([Florides et al., 2013](#)). Estos sondeos tienen por objeto la transmisión térmica desde o hacia el subsuelo para una amplia variedad de aplicaciones, que abarcan desde climatización de piscinas y edificios, hasta aplicaciones en procesos industriales, agricultura (invernaderos, etc.), acuicultura (piscifactorías, producción de algas, etc.) o balneoterapia.

De acuerdo a las conclusiones del Consejo de la Unión Europea sobre el Plan de Eficiencia Energética de 10 de junio de 2011, donde se ponía de relieve que los edificios representan el 40 % del consumo de energía de la Unión Europea, y considerando que una parte importante de este porcentaje se consume en climatización y ACS, se puede fácilmente vislumbrar un escenario favorable para el aumento en los años venideros de los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura, máxime teniendo en cuenta la continua evolución del precio del suelo en las zonas urbanas, que obliga a que las viviendas unifamiliares dispongan de pequeñas parcelas con una superficie insuficiente para implementar un sistema geotérmico horizontal.

De las distintas configuraciones posibles para una instalación geotérmica de muy baja temperatura, la más viable cuando se dispone de poca superficie de terreno, es la formada por un bucle vertical cerrado. Dicha configuración, al no verse además limitada por la normativa medioambiental, al tratarse de un sistema en circuito cerrado, es la que ha tenido un mayor desarrollo en los últimos años.

En un sondeo geotérmico de muy baja temperatura se encuentran 4 elementos:

- La tubería.
- El fluido caloportador.
- El relleno geotérmico.
- El terreno circundante.

De estos elementos que intervienen en un sondeo geotérmico, el terreno circundante a la perforación no puede sustituirse por otro. Sin embargo, la tubería, el fluido caloportador y el relleno geotérmico sí.

En la Figura 4 se muestran, de forma gráfica, los elementos citados.

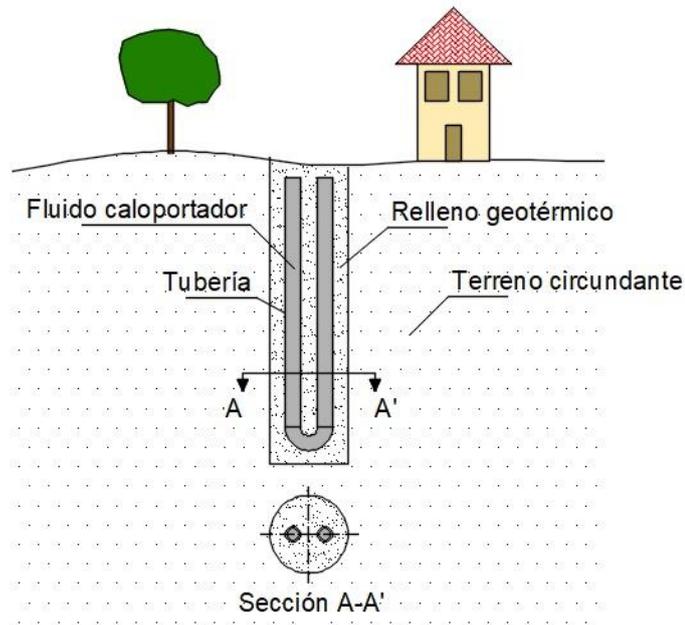


Figura 4. Elementos de un sondeo geotérmico de muy baja temperatura.

En los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura, se produce la extracción de calor desde el terreno hacia el fluido que recorre el interior de los intercambiadores de calor o se disipa el calor desde los intercambiadores de calor hacia el terreno para la obtención de frío.

Para que se pueda extraer el calor del terreno, el fluido caloportador tiene que tener menor temperatura que el terreno y análogamente, para que se pueda disipar el calor al terreno, el fluido caloportador tiene que tener mayor temperatura que el terreno. Así, cuanto mayor sea la diferencia en grados, entre ambas temperaturas, mejor será el intercambio térmico y por tanto mayor será el rendimiento. La temperatura mínima y máxima del fluido caloportador en las sondas geotérmicas viene, respectivamente, determinada por la temperatura mínima de evaporación y máxima de condensación de las bombas de calor.

Los métodos de perforación de los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura son dos principalmente ([Orche García, 2011](#)):

- **Rotación.** La fragmentación del terreno se consigue como consecuencia del corte producido por una herramienta de perforación, que según el tipo de terreno será un tricono o un trépano. Aunque es poco frecuente, también puede utilizarse una corona.

- RotoperCUSión. Se basa en la fragmentación del terreno por medio de los golpes que, generados mediante un martillo, se transmiten al fondo del barreno por medio de un elemento final, llamado boca. Puede ser con martillo en fondo o en cabeza.

En cuanto a la evacuación de los detritus de perforación, principalmente se realiza mediante la inyección y circulación de un fluido.

Una vez finalizada la perforación e inmediatamente después de la retirada del varillaje, se procede a la introducción de la tubería geotérmica en el sondeo. Para facilitar esta operación se suele utilizar un peso, lastrando así la tubería. Para conseguir la adecuada separación entre los tubos se pueden emplear unos elementos llamados distanciadores y para favorecer la introducción de los tubos dentro del sondeo se pueden utilizar un carrusel y un slangman. Posteriormente, se coloca en superficie una arqueta, dentro de la cual se instala el distribuidor, y una vez finalizadas todas las conexiones hidráulicas se hacen las pruebas de estanqueidad y presión. Finalmente, el espacio existente entre las paredes del sondeo y la tubería se rellena convenientemente. Por último, se instala la bomba de calor en el edificio y se llena la tubería con el fluido caloportador que circulará, en circuito cerrado, con la ayuda de una bomba centrífuga situada en superficie.

La perforación y la bomba de calor representan un porcentaje importantísimo del coste total de la instalación geotérmica. Sin embargo, los costes de la tubería, el fluido caloportador y el material de relleno suelen ser muy pequeños frente al coste total.

2.1.5 Situación de la energía geotérmica en España

A pesar de que España dispone de recurso geotérmicos de alta temperatura, aún no se produce en España energía eléctrica a partir de la energía geotérmica, pero hay instalados sistemas de usos directos del calor para climatización, balneoterapia, piscinas e invernaderos. La potencia total instalada en 2015 se estima en unos 64,1 MW térmicos, de los que un 67 % corresponden a las instalaciones con bomba de calor ([Lund y Boyd, 2016](#)).

[El Plan de Energías Renovables \(PER\) 2011-2020](#), aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros de 11 de noviembre de 2011, señala que en España se ha producido un notable incremento del número de instalaciones geotérmicas con bomba de calor entre los años 2011 y 2015, siendo el crecimiento superior al 30 % en ese periodo. Entre 2015 y 2020 el crecimiento se ha mantenido en una tasa próxima al 10 %. Por tanto, existe un mercado emergente de aplicación y uso de la bomba de calor geotérmica para climatización y ACS.

2.1.6 Situación de la energía geotérmica en Asturias

En Asturias no hay recursos geotérmicos de alta, media ni baja temperatura.

Los recursos geotérmicos de muy baja temperatura se deben a la constancia de la temperatura del subsuelo y, como se ha mencionado en apartados anteriores, existen prácticamente en todo el ámbito territorial, pues se requiere una temperatura menor de 30 °C. Estos recursos se presentan bajo dos formas:

- Energía térmica contenida en el terreno más superficial.
- Energía térmica contenida en los acuíferos someros.

De acuerdo a la Fundación Asturiana de la Energía ([FAEN](#)) la potencia total instalada en el Principado de Asturias era, a diciembre de 2019, de unos 7,6 MW térmicos repartidos en 291 instalaciones, de las cuales aproximadamente el 75 % se realizan mediante sondeo vertical.

2.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor en los sondeos geotérmicos es muy importante, por ello son varios los autores ([Eskilson y Claesson, 1988](#); [Deerman y Kavanaugh, 1991](#); [Allan y Philippacopoulos, 2000](#); [Philippacopoulos y Berndt, 2001](#); [Zeng et al., 2003](#); [Li et al., 2006](#); [Sharqawy et al., 2009](#)), que han desarrollado modelos analíticos y numéricos para su estudio.

El calor es una forma de energía en tránsito que tiene sentido durante el intercambio de energía entre las distintas partes de un sistema o entre un sistema y su entorno.

Siempre que exista una diferencia de temperatura en un medio se presenta flujo de calor. La propagación del calor se realiza desde los medios de temperatura más elevada a los más fríos. Esta transferencia o transmisión de calor tiene lugar hasta que se alcanza el equilibrio térmico, es decir, hasta que los dos medios alcanzan la misma temperatura.

En función de que la temperatura varíe o no con el tiempo, la transmisión de calor puede ser en régimen transitorio o en régimen estacionario, también llamado permanente o estable.

2.2.1 Mecanismos de transferencia de calor

Básicamente son tres los mecanismos de transmisión de calor: Conducción, convección y radiación. Según [Sanner \(2011\)](#), en los sondeos geotérmicos la radiación puede despreciarse e incluso en los materiales poco porosos puede afirmarse que la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción.

2.2.1.1 Conducción

La teoría matemática de la conducción de calor en sólidos, se debe principalmente a Jean Baptiste Joseph Fourier ([Ingersoll et al., 1954](#)).

Este mecanismo puede ser entendido como un proceso de transporte de calor a escala microscópica. La conducción, que se produce principalmente entre sólidos, es debido a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. En los gases y líquidos se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio ([Cengel y Ghajar, 2011](#)).

La conducción de calor a través de un material se rige por la ley de Fourier:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad [1]$$

Donde \vec{q} es el flujo térmico (calor transferido por unidad de tiempo y por unidad de área), λ es la conductividad térmica y ∇T representa el gradiente de temperatura.

El signo menos indica que el calor fluye en dirección opuesta al gradiente de temperaturas (de la zona con mayor temperatura hacia la zona con menor temperatura), de acuerdo al segundo principio de la Termodinámica.

En el caso de una transmisión de calor unidimensional, a través de una pared plana, se tiene:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [2]$$

Donde \dot{Q} es la potencia térmica, λ es la conductividad térmica, A es el área de la pared, ΔT es el salto térmico e Δx es el espesor de la pared.

2.2.1.2 Convección

El fenómeno de transporte de calor por convección tiene lugar mediante los movimientos macroscópicos de un fluido. Estos movimientos pueden ser causados por un agente externo, en cuyo caso se denomina convección forzada, o causados por variaciones de la densidad provocadas por los cambios de temperatura, denominada entonces convección natural. El modelo que describe el fenómeno del flujo de calor por convección se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T - T_0) \quad [3]$$

Donde \dot{Q} es la potencia térmica, h es el coeficiente de convección o coeficiente de película, A es el área de la superficie a través de la cual tiene lugar la transmisión de calor, T es la temperatura de la pared y T_0 es la temperatura del fluido sin perturbar.

El coeficiente de convección, a diferencia de la conductividad térmica, no es una propiedad intrínseca del material y depende de parámetros que están relacionados con la geometría del sistema y las características del fluido.

Este mecanismo de transmisión de calor es propio de los fluidos y para su determinación se usa el número adimensional de Nusselt N_u , definido como:

$$N_u = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad [4]$$

Donde h es el coeficiente de convección, D es el diámetro de la tubería y λ es la conductividad térmica.

2.2.1.3 Radiación

En este mecanismo la energía radiada es transferida por ondas electromagnéticas que no requieren de un medio para su propagación, pudiendo por tanto transmitirse en el vacío.

Siendo un cuerpo negro aquel que absorbe toda la radiación incidente, la cantidad de energía radiante emitida por unidad de tiempo y de área por un cuerpo negro se denomina poder emisivo y viene expresada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad [5]$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, y T es la temperatura absoluta del cuerpo.

Si se trata de un cuerpo gris, para calcular la radiación emitida hay que tener en cuenta la emisividad, ε , cuyo valor está comprendido entre 0 y 1. Por tanto, la potencia radiante emitida por un cuerpo gris, se expresa como:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad [6]$$

Donde ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, A es el área de la superficie emisora y T es la temperatura absoluta del cuerpo.

2.3 Propiedades térmicas

Una vez vistos los tres mecanismos de transmisión de calor, se procede a describir las cuatro propiedades térmicas más importantes.

Estas cuatro propiedades son la conductividad térmica, la capacidad calorífica volumétrica, la difusividad térmica y la dilatación térmica, pero sólo las tres primeras están relacionadas con la transferencia de calor y, por tanto, tienen una importancia capital en toda instalación geotérmica, siendo clave el conocimiento de las mismas para el correcto diseño de una instalación geotérmica.

Por su parte, teniendo en cuenta las dimensiones de los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura, puede llegar a producirse una dilatación térmica de la sonda geotérmica de varios centímetros, en la dirección longitudinal. Sin embargo, puede considerarse despreciable en la dirección radial por ser submilimétrica.

2.3.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para transmitir calor por conducción. En los materiales sólidos la energía térmica es transportada por las vibraciones de la red (fonones) y por los electrones libres, siendo la conductividad térmica la suma de la contribución fonónica y la contribución electrónica ([Montes et al., 2014](#)).

Se denota con la letra griega λ y en el sistema internacional se mide en W/m·K. Un valor elevado de la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor térmico, mientras que un valor bajo indica que se trata de un aislante térmico.

La conductividad térmica de un material varía, entre otros factores, con:

- ✓ La composición química.
- ✓ La porosidad.
- ✓ Distribución de las partículas.
- ✓ La humedad.
- ✓ La temperatura.

Aunque la conductividad térmica depende de la temperatura, generalmente, dentro de un rango moderado de temperatura, se considera constante.

2.3.1.1 Conductividad térmica del terreno

Según la norma [UNE 100715-1:2014](#) uno de los parámetros que se deben conocer en los sistemas geotérmicos de lazo cerrado vertical es la conductividad térmica del terreno.

En la Tabla 1 se muestra la conductividad térmica media de algunos terrenos.

Tabla 1. Conductividad térmica del terreno (Fuente: [Sanner, 2011](#); [ATECYR, 2012](#)).

Tipo de terreno	Conductividad térmica [W/m·K]
Arena seca	0,4
Grava seca	0,4
Arcilla seca	0,5
Arcilla saturada	1,7
Marga	2,1
Mármol	2,1
Limolita y argilita	2,2
Arenisca	2,3
Caliza	2,8
Gneis	2,9
Granito	3,4
Cuarcita	5,5

2.3.1.2 Conductividad térmica de los rellenos geotérmicos

En la Tabla 2 se muestra la conductividad térmica, en condiciones secas, de algunos rellenos geotérmicos típicos. El valor correspondiente a los detritus de perforación varía dependiendo del tipo de roca y la granulometría. Igualmente, la conductividad térmica de un mortero con arena varía según sea el tipo, dosificación y granulometría de la arena utilizada.

Tabla 2. Rellenos geotérmicos típicos (Fuente: [Hellström, 2011](#); [Creus Solé, 2008](#)).

Tipo de relleno geotérmico	Conductividad térmica [W/m·K]
Arena sílicea	0,4
Detritus de perforación	0,2-0,6
Agua (sin circulación)	0,6
Bentonita	0,7
Pasta de cemento	0,8
Mortero de cemento con bentonita	0,8
Mortero de cemento con arena	1,2-2,2

2.3.1.3 Resistencia térmica de contacto en los ensayos de conductividad térmica

Si dos superficies sólidas que están a distinta temperatura se ponen en contacto aparece una resistencia térmica en la interface de las dos superficies, que se conoce como resistencia de contacto. Esta se desarrolla cuando las dos superficies no ajustan perfectamente y, por tanto, no hay un contacto térmico perfecto, quedando entre ambas una delgada capa de fluido.

En la mayoría de los métodos de medida de la conductividad térmica (véase apartado 2.4) se produce una resistencia de contacto durante el ensayo que dependerá principalmente de:

- La rugosidad superficial de los dos sólidos en contacto. Lo ideal es que las superficies sean lisas. En la Figura 5 se observa cómo, cuanto mayor sea la rugosidad de las dos probetas menor será la transferencia térmica, pues disminuyen los puntos de contacto entre las probetas.

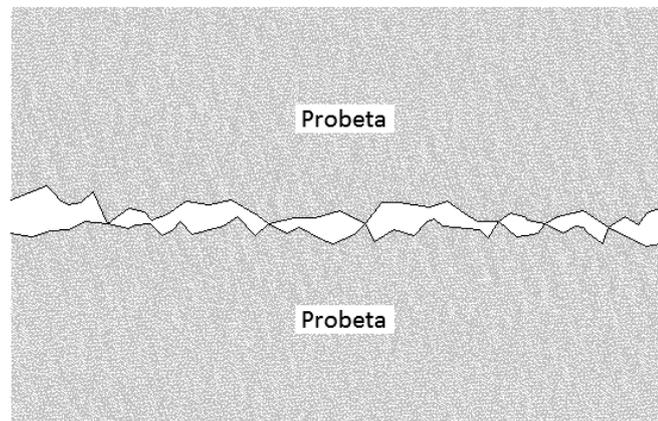


Figura 5. Rugosidad superficial entre las probetas.

- La presión que mantiene en contacto las dos superficies. Se suele utilizar una pesa o cualquier otro elemento que ejerza presión sobre la muestra.
- Las propiedades del material de la interface. Es común utilizar pasta térmica o algún otro material para disminuir la resistencia de contacto.

2.3.2 Capacidad calorífica volumétrica

Esta magnitud física se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a un metro cúbico de sustancia para elevar su temperatura un grado centígrado sin cambiar de fase. La capacidad calorífica volumétrica indica el calor que es capaz de almacenar un volumen de material al incrementarse su temperatura, pero también la oposición a dicho cambio de temperatura. Así pues, un valor más alto de la capacidad calorífica volumétrica implica un mayor tiempo para que el sistema alcance el equilibrio térmico.

Se expresa como el producto de la densidad ρ por el calor específico c_p . Sus unidades en el Sistema Internacional son $J/(m^3 \cdot K)$. Por su parte, el calor específico se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia.

2.3.3 Difusividad térmica

Es la magnitud que cuantifica la velocidad a la que se distribuye el calor en un material y no sólo depende de la conductividad térmica sino también de la velocidad a la que la energía puede ser almacenada. El significado físico de la difusividad está asociado a la velocidad de propagación del calor y, por tanto, con el tiempo que el material tarda en alcanzar el equilibrio térmico. Indica la velocidad con la que varía la temperatura a través de un material.

La difusividad térmica se define como el cociente entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica. En el Sistema Internacional se mide en m^2/s y su expresión es la siguiente:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [7]$$

Donde α es la difusividad térmica, λ la conductividad térmica y $\rho \cdot c_p$ la capacidad calorífica volumétrica.

2.3.4 Dilatación térmica

Cuando un cuerpo recibe calor, aumenta la energía cinética de sus partículas y se mueven con más velocidad. Al moverse más rápidamente tienden a ocupar más espacio y por ello, aumenta el volumen del cuerpo. Lo contrario ocurrirá si el cuerpo pierde calor.

Desde un punto de vista atómico, la dilatación térmica se refleja en un aumento en la distancia media de separación entre los átomos ([Callister, 2007](#)).

La magnitud del aumento o disminución de tamaño depende de la naturaleza del cuerpo, las dimensiones iniciales del cuerpo y la variación de temperatura experimentada. Así, el cambio de longitud con la temperatura para un material sólido se expresa con la siguiente expresión:

$$\Delta L = \alpha_L \cdot \Delta T \cdot L_0 \quad [8]$$

Donde α_L es el coeficiente lineal de dilatación térmica, expresado en $(^\circ C)^{-1}$. ΔT es el incremento de temperatura y L_0 es la longitud inicial.

2.4 Métodos de medida de la conductividad térmica

El estudio experimental de la conductividad térmica de los sólidos se inició en el siglo XVIII de la mano de Benjamín Franklin ([Guarachi Solano, 2015](#)).

Los fundamentos matemáticos y primeras aplicaciones de muchos de los métodos ya fueron desarrollados en el siglo XIX. No obstante, la mayoría de ellos han experimentado grandes modificaciones a lo largo de los años.

Las soluciones de la Ley de Fourier utilizando las condiciones de contorno adecuadas, permite resolver el problema de conducción de calor unidimensional y estacionaria para geometrías planas, cilíndricas y esféricas. Conocidas estas soluciones, podrán emplearse dispositivos basados en las mencionadas geometrías para determinar el coeficiente de conductividad térmica del material que se requiera. Es por ello que la mayoría de los métodos reducen la transferencia de calor a un problema de transmisión de calor unidimensional en el que se usan muestras planas y cilíndricas, y en menor medida muestras esféricas debido a la dificultad que entraña la fabricación de las mismas.

Son muchos los métodos conocidos para la determinación de la conductividad térmica de los materiales, y éstos se pueden clasificar desde varios puntos de vista: Por ejemplo, teniendo en cuenta la forma del calefactor (lineal, superficial o volumétrica) o el tamaño de las muestras (de escala milimétrica, centimétrica, decimétrica o métrica).

No obstante, de forma general, los distintos métodos pueden ser clasificados en dos grandes grupos ([dos Santos, 2002](#)):

- Métodos directos. Son los que miden directamente la conductividad térmica a partir de resultados experimentales.
- Métodos indirectos. Son aquellos que miden experimentalmente una determinada propiedad del material y es a partir de esa propiedad como se obtiene el valor de la conductividad térmica.

Por otra parte, de acuerdo al régimen de transferencia de calor, cada uno de los dos grupos se pueden dividir en dos clases:

- Métodos estacionarios. Son aquellos en los que se mide la conductividad térmica cuando la transmisión de calor es en régimen permanente y, por tanto, las muestras de ensayo están sujetas a un perfil de temperatura invariante con el tiempo pues se ha alcanzado el equilibrio térmico.

- Métodos transitorios. Son aquellos que miden la conductividad térmica cuando la transferencia de calor es en régimen variable y, por tanto, la temperatura varía en cada punto a lo largo del tiempo.

Por otra parte, la mayoría de los métodos, tanto estacionarios como transitorios, se pueden clasificar en dos categorías:

- Métodos de flujo de calor longitudinal. Son aquellos en los que el flujo de calor se transmite en la dirección longitudinal (axial) de la muestra. En estos métodos se determina el gradiente de temperatura en una muestra de sección uniforme, que es calentada por una cara y refrigerada por la opuesta.
- Métodos de flujo de calor radial. Son aquellos métodos en los que el flujo de calor se transmite radialmente a lo largo de la muestra y los gradientes de temperatura se miden en muestras que rodean completamente la fuente de calor.

Por último, la mayoría de los métodos, tanto de flujo de calor longitudinal como de flujo de calor radial, se pueden agrupar en:

- Métodos comparativos. Son aquellos que requieren del uso de una o más muestras de referencia con conductividad térmica conocida. En estos métodos no se mide el flujo de calor, sino que se obtiene al despejarlo de la Ley de Fourier y por ello se hace necesario colocar una o varias muestras de conductividad térmica conocida en serie con la muestra a ensayar.
- Métodos absolutos. Son aquellos mediante los cuales se obtiene la conductividad térmica directamente a través de una ecuación analítica y, por tanto, sin la necesidad de utilizar muestras de conductividad térmica conocida. En estos métodos se realiza la medida del flujo de calor a través de la muestra de dos formas: midiendo directamente el flujo de calor mediante un sensor o bien midiendo la energía eléctrica disipada por la fuente de calor.

2.4.1 Métodos más utilizados comercialmente

La mayoría de los equipos comerciales implementan el método de la Placa Caliente Guardada (GHP), el método del Medidor de Flujo de Calor (HFM), el método del Hilo Caliente Transitorio (THW), el método de la Fuente Plana Transitoria (TPS) y el método Flash.

A continuación, en la Tabla 3, se muestra un resumen con las características más importantes.

Tabla 3. Características de los métodos de medida más utilizados comercialmente.

	Métodos					
	GHP	HFM	THW	TPS	Flash	
Clasificación	directo estacionario absoluto	directo estacionario comparativo	directo transitorio absoluto	directo transitorio absoluto	Indirecto transitorio absoluto	
Número de probetas necesarias	2	1	2	2	1	
Sección de las muestras	cuadrada y circular	cuadrada y circular	rectangular y circular	rectangular y circular	circular	
Tamaño mínimo de las muestras	decimétrico	decimétrico	centimétrico	centimétrico	milimétrico	
Material de las muestras	sólido	sólido	sólido, líquido y gas	sólido y líquido	sólido y líquido	
Conductividad térmica [W/m·K]	0,002-2	0,002-2	0,02-20	0,01-500	0,1-1.500	
Temperatura [K]	80-900	253-400	273-1.800	50-1.000	100-3.300	
Tiempo de medida	horas	horas	segundos/ minutos	segundos	segundos	
Normas	ISO	8302	8301	8894	22007	18755
	UNE-EN	12667	12667	993	---	---
	DIN-EN	12667	12667	993	---	821
	ASTM	C177	C518	C1113	---	E1461

2.4.2 Método del Hilo Caliente Transitorio (THW)

Este método consiste en hacer pasar, durante un tiempo determinado, la corriente eléctrica por un hilo que está colocado en un medio del cual se quiere determinar la conductividad térmica. La generación de calor en el hilo produce un aumento de temperatura que depende de la conductividad térmica del material a ensayar. Para medir el incremento de temperatura a lo largo del tiempo se pueden utilizar dos tipos de sensores: termopar o termorresistencia.

Dentro del método THW existen tres técnicas clásicas: la técnica del hilo paralelo (parallel), la técnica del hilo cruzado (cross-array) y la conocida como técnica del termómetro de resistencia de platino o técnica T(R). Esta última utiliza una termorresistencia, mientras que las dos primeras utilizan termopares. En las dos primeras técnicas el hilo de calentamiento y el termopar están intercalados entre las dos probetas que constituyen la muestra de ensayo.

En la técnica del hilo paralelo (Figura 6) el termopar se sitúa a una distancia del hilo de calentamiento que suele estar comprendida entre 1 y 15 mm, mientras que en la técnica del hilo cruzado el termopar está soldado sobre el propio hilo de calentamiento.

En la técnica del termómetro de resistencia de platino la medición de la temperatura se lleva a cabo en toda la longitud del hilo. En esta técnica el hilo, que igualmente está emplazado entre las dos probetas, es a la vez la fuente de calor y el sensor de temperatura.

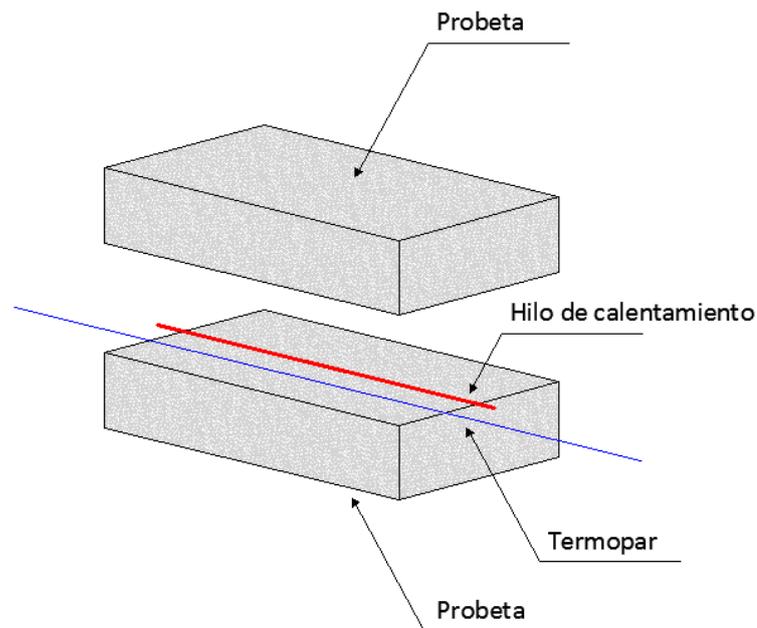


Figura 6. Técnica del hilo paralelo.

La técnica del hilo cruzado, la técnica T(R) y la técnica del hilo paralelo son especialmente utilizadas cuando el material a ensayar tiene, respectivamente, una conductividad térmica inferior a 2 W/m·K, 15 W/m·K y 20 W/m·K. En los últimos años se han desarrollado otras técnicas, como la técnica de los dos termopares paralelos ([dos Santos, 2005b](#)).

El método THW solamente está estandarizado para la medida de la conductividad térmica de los materiales refractarios, según las siguientes normas:

- ✓ Norma ISO 8894-1 para la técnica del hilo cruzado y la técnica T(R).
- ✓ Norma ISO 8894-2 para la técnica del hilo paralelo.
- ✓ Norma UNE-EN 993-14 para la técnica del hilo cruzado.
- ✓ Norma UNE-EN 993-15 para la técnica del hilo paralelo.

- ✓ Norma DIN-EN 993-14 para la técnica del hilo cruzado.
- ✓ Norma DIN-EN 993-15 para la técnica del hilo paralelo.
- ✓ Norma ASTM C1113 para la técnica T(R).

Hoy en día, cuando el método THW se utiliza en la medición de fluidos, el hilo suele ser de platino, que actúa a la vez como fuente de calor y sensor de temperatura, con una longitud similar a la utilizada en la medición de muestras sólidas, pero con un diámetro más pequeño, en el rango 10-90 μm . Sin embargo, para la medida de la conductividad térmica en muestras sólidas generalmente se usa un hilo de platino o de nicromo con una longitud de 100-300 mm y un diámetro con valores comprendidos entre 0,1 y 0,5 mm.

[Xin Gang \(1995\)](#) señala que el método THW ha sido ampliamente utilizado en la determinación de la conductividad térmica de gases, líquidos y sólidos. Según [Hammerschmidt y Sabuga \(2000\)](#), entre los métodos transitorios para medir el valor de la conductividad térmica en los sólidos dieléctricos, el método THW es el que se utiliza más frecuentemente.

2.5 Rellenos geotérmicos

El relleno geotérmico es el material que se introduce en los sondeos geotérmicos para ocupar el hueco comprendido entre las paredes del sondeo y la tubería, tal como puede verse en la Figura 4. No obstante, en las zonas donde el nivel freático está próximo a la superficie del terreno puede utilizarse como material de relleno las propias aguas subterráneas y, de hecho, en el norte de Europa es bastante usual ([Hellström, 2011](#)).

En un intercambiador de calor vertical el calor es extraído desde, o cedido hacia, el terreno por medio de tuberías enterradas a través de las cuales circula un fluido caloportador en circuito cerrado. El hueco que queda entre dichas tuberías y las paredes del sondeo se debe rellenar adecuadamente para así mejorar la transferencia térmica entre el subsuelo y el fluido que circula por el interior de la tubería. La utilización en los sondeos de un material de relleno de alta conductividad térmica tiene como consecuencia, o una disminución en el número de metros de tubería, reduciendo el tiempo de amortización de la instalación, o bien un aumento de la eficiencia energética de dicha instalación, reduciendo el consumo de energía de la instalación geotérmica. Así pues, el conocimiento de las propiedades térmicas del material de relleno es clave pues reporta ventajas de tipo económico y medioambiental. Además, el relleno geotérmico debe evitar un cortocircuito hidráulico entre los distintos acuíferos que atraviesa el sondeo y debe mantener la estabilidad de la pared del mismo. Por lo tanto, los rellenos geotérmicos son formulados teniendo en cuenta criterios tan importantes como la conductividad térmica, la permeabilidad, la resistencia mecánica, la durabilidad y el respeto medioambiental.

El relleno geotérmico puede realizarse por gravedad o, más comúnmente, utilizando una tubería de inyección de PEAD con un diámetro de 25 mm. La inyección se realiza desde el fondo del sondeo y en sentido ascendente con la boca de descarga totalmente sumergida en el relleno, minimizando así la segregación y la contaminación del relleno con las paredes del sondeo. Las bombas más utilizadas para la inyección del relleno son las bombas de tornillo, las bombas de diafragma y las bombas de émbolo.

A pesar de cumplir una serie de funciones muy importantes, como se verá en el apartado 3.3.3, al material de relleno, durante muchos años, no se le ha dado la atención requerida, y consecuentemente muchas de las instalaciones geotérmicas son susceptibles de mejora.

Actualmente, son muchos los autores que hacen hincapié en la importancia de los rellenos geotérmicos. Así, según indican [Smith y Perry \(1999\)](#), una mayor conductividad térmica del relleno mejora el rendimiento de la instalación geotérmica. Por su parte, [de Isabel \(2010\)](#) señala que la utilización de un mortero mejorado térmicamente va a producir una disminución en el número de metros lineales de tubería de intercambio térmico, lo cual provoca una reducción del coste de la instalación geotérmica. En la misma línea [Fernández Pérez et al. \(2010\)](#) consideran que, en general, la utilización de un buen material de relleno trae consigo una disminución en la profundidad de los sondeos entre un 10-20 %, mientras que [Borinaga Treviño et al. \(2012\)](#) demuestran que la longitud requerida en los sondeos geotérmicos, utilizando un mortero de arena silíceo y cemento Portland, se reduce un 18 % respecto al uso de pasta de cemento. Para [Indacochea Vega et al. \(2015\)](#) el uso de un material de relleno apropiado es fundamental para proporcionar una transferencia térmica efectiva, y también para cumplir con las exigencias mecánicas y medioambientales. [Park et al. \(2015\)](#) señalan que un buen relleno geotérmico puede conducir a importantes ahorros económicos al reducirse la longitud total de perforación. [Han y Yu \(2016\)](#) también enfatizan en la importancia de la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos.

También es importante la relación entre la conductividad térmica del relleno y del terreno circundante ([Smith y Perry, 1999](#); [Jun et al. 2009](#); [Sáez Blázquez et al. 2017a](#)), para así evitar reducir la eficiencia del sistema. Por su parte, [Erol y François \(2014\)](#) indican que en los sondeos sólo está justificado el uso de rellenos con una elevada conductividad térmica cuando la conductividad térmica del terreno también es elevada.

En general, el relleno de todo sondeo geotérmico es considerado como el elemento más importante del sondeo, pues es el más sensible a la degradación con el paso del tiempo, especialmente si está sometido a ciclos de humedad-sequedad ocasionados por la variación del nivel freático, disminuyendo así la eficiencia energética de la instalación geotérmica. El relleno geotérmico también es el elemento más difícil de controlar, pues se prepara in situ y su colocación dentro del sondeo condiciona su futuro comportamiento, estando, por tanto, sus propiedades supeditadas a un correcto amasado y puesta en obra.

En una instalación geotérmica el coste del relleno es, generalmente, muy pequeño respecto al coste total de la obra, por tanto, no tiene sentido reducir la calidad de esta unidad de obra con el objeto de abaratar costes.

El uso de unos materiales de relleno u otros está determinado, en parte, por las condiciones hidrogeológicas del subsuelo, pues si la permeabilidad es baja podrán realizarse rellenos a base de arena o detritus, mientras que si el terreno es permeable, o se conoce la existencia de acuíferos, es totalmente necesario sellar la perforación para evitar interconexiones hídricas ([ATECYR, 2010](#)).

Cuando el relleno geotérmico se realiza con mortero recibe el nombre de mortero geotérmico.

2.5.1 Propiedades físicas y mecánicas de los morteros geotérmicos

Las principales propiedades físicas y mecánicas de los morteros son las siguientes ([Jiménez Montoya et al., 2000](#); [Bustillo Revuelta, 2008](#); [González de Vallejo et al., 2002](#)):

- **Densidad.** Es la relación entre la masa del relleno y su volumen. Su valor depende, sobre todo, de la cantidad de áridos y adiciones que contenga, y en menor medida de la relación agua/cemento. A su vez, en función de la masa y el volumen considerado, se tiene la densidad aparente, la densidad seca o la densidad de las partículas sólidas. La densidad se denota por la letra griega ρ y, en unidades del Sistema Internacional, se expresa en kg/m^3 .
- **Porosidad.** Es la parte de volumen unitario de relleno que no está ocupado por las partículas sólidas, es decir, es la relación entre el volumen de poros y el volumen total, por tanto, es un parámetro adimensional. Se denota por la letra n .
- **Humedad.** Es la relación entre el peso del agua que contiene el relleno y el peso de sus partículas sólidas, así pues, es una propiedad adimensional. Se denota con la letra griega ω .
- **Isotropía.** Es la característica que presentan aquellos materiales que tienen el mismo comportamiento independientemente de la dirección, es decir, sus propiedades no varían con la dirección. A escala macroscópica el relleno será isotrópico y, por tanto, la dilatación térmica y la retracción serán iguales en todas direcciones.
- **Anisotropía.** Es la característica opuesta a la isotropía.
- **Permeabilidad.** Es la propiedad que mide la facilidad con la que el agua circula a través del relleno. Además de la cantidad de poros, depende del tamaño, forma, distribución (tortuosidad) e interconexión de estos. El coeficiente de permeabilidad, también

conocido como conductividad hidráulica, puede definirse como la velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario, se denota con la letra k y en el Sistema Internacional se expresa en m/s.

- Adherencia. Es la capacidad que tiene el relleno geotérmico de soportar las tensiones que tienden a separarlo de las superficies con las que está en contacto.
- Homogeneidad. Es la cualidad por la que los diferentes componentes que forman el relleno aparecen regularmente distribuidos en toda la masa. Aunque el relleno es microscópicamente heterogéneo, debido a que los granos son de naturaleza y dimensiones variables y que además en él coexisten tres fases: la sólida (áridos, conglomerantes, adiciones y aditivos), la líquida (agua de amasado y aditivos) y la gaseosa (aire ocluido), a escala macroscópica debe de ser homogéneo, lo cual se consigue con un buen amasado y una adecuada colocación en el interior del sondeo.
- Durabilidad. Es la capacidad del relleno para mantenerse sin degradación durante la vida de servicio del sondeo geotérmico.

Los principales agentes que reducen la durabilidad del relleno son: las acciones mecánicas (producidas por las vibraciones, la erosión de las corrientes de agua...), las acciones físicas (producidas por las variaciones de temperatura, las variaciones de humedad, la formación de hielo...), las acciones químicas (producidas por vertidos al terreno de aguas residuales, por el contacto con aguas subterráneas con contenidos en sulfatos o con terrenos yesíferos, por la reactividad de los áridos con la presencia de álcalis...) y las acciones biológicas (producidas por los roedores, la vegetación...).

- Consistencia. Es la facilidad que una masa fresca tiene para deformarse. Varía según varios factores: la cantidad de conglomerante, la cantidad de agua de amasado, la cantidad y tipo de aditivos, así como el tamaño máximo, la forma y la granulometría de los áridos y adiciones.
- Viscosidad. Es la facilidad que una masa fresca tiene para fluir. Esta propiedad varía según los mismos factores que la consistencia.

La viscosidad puede ser dinámica, que se representa con la letra griega μ , y cinemática, representada por la letra griega ν , siendo esta el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el Sistema Internacional, las unidades de la viscosidad dinámica son Pa·s y las de la viscosidad cinemática son m^2/s .

- Docilidad. También denominada trabajabilidad. Es la facilidad que presenta el relleno para su puesta en obra. La docilidad varía según los mismos factores vistos para la consistencia, estando ambas relacionadas entre sí.

- Tiempo de fraguado. Se define como el tiempo durante el cual el relleno puede ser utilizado, con la adecuada trabajabilidad, pues todavía no ha comenzado el fraguado.
- Resistencia mecánica. Es la capacidad que tiene el relleno de soportar esfuerzos sin romperse. Depende del tipo y cantidad de conglomerante, de la dosificación, tipo y tamaño de los áridos y adiciones, de la colocación en obra, de las condiciones de curado y de la relación agua/cemento. En el Sistema Internacional se expresa en N/m².

2.5.2 Componentes utilizados en los rellenos geotérmicos

Los principales componentes utilizados en la fabricación de los rellenos geotérmicos son los áridos, el cemento, el agua y los aditivos. En ocasiones, también se utilizan otros componentes como la bentonita, las fibras, la alúmina, el grafito, etc.

2.5.2.1 Áridos

La Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos ([ANEFA](#)) define los áridos como aquellos materiales granulares, sólidos e inertes que se usan en la construcción y en diversas aplicaciones industriales.

Los áridos se clasifican en tres grupos ([López Jimeno et al., 2003](#)):

- Naturales. Se subdividen, a su vez, en áridos granulares y áridos de machaqueo. Los granulares están formados por partículas redondeadas, son obtenidos en areneros y graveras y requieren lavado y clasificación, mientras que los de machaqueo están formados por partículas angulosas, se obtienen en canteras y precisan trituración, molienda y clasificación. Los principales áridos naturales son las arenas y las gravas, diferenciándose en el tamaño de grano, cuya barrera divisoria algunos autores la establecen en 4 mm ([Jiménez Montoya et al., 2000](#)) y otros en 2 mm ([González de Vallejo et al., 2002](#)).
- Artificiales. Se obtienen como residuos de procesos industriales. Los áridos artificiales más destacados son las cenizas volantes, los residuos mineros (estériles de escombrera y colas de lavadero), las escorias siderúrgicas (escoria de horno alto, escorias LD, escorias negras y escorias blancas) y el humo de sílice.
- Reciclados. Se generan con la destrucción de construcciones existentes (edificios, puentes, carreteras, etc.). Son los áridos procedentes de los residuos de construcción y demolición (RCD).

A continuación, se procede a describir detalladamente los tipos de áridos, tanto artificiales como reciclados, más destacables por su disponibilidad y capacidad de valorización en los

rellenos geotérmicos, siendo la valorización, según el artículo 3 de la [Ley 22/2011](#), cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular.

- Cenizas volantes. Se obtienen en los precipitadores electrostáticos o en los filtros de mangas de las centrales termoeléctricas de carbón y de fuelóleo, de la incineración de residuos, etc. En función de la composición química, que depende fundamentalmente de la naturaleza del carbón utilizado, se clasifican en:
 - Cenizas volantes silíceas. Tienen propiedades puzolánicas por lo que reacciona con la portlandita que se ha formado durante la hidratación del cemento.
 - Cenizas volantes calcáreas. Además de carácter puzolánico, pueden tener propiedades hidráulicas.

Según la [Lista Europea de Residuos](#), las cenizas volantes de las centrales térmicas de carbón no son consideradas residuos peligrosos. Pero las cenizas volantes procedentes de la combustión de fuelóleo o de la incineración de residuos sí lo son, puesto que las cenizas volantes de las calderas y hornos de fuelóleo contienen importantes cantidades de metales pesados, mientras que las de las incineradoras de residuos contienen también dioxinas y furanos.

- Cenizas de fondo. Se obtienen en los hogares de las calderas de las centrales térmicas de carbón o fuelóleo, en los hornos de las incineradoras, en los hogares de las calderas industriales de biomasa, etc.

Las cenizas volantes y las cenizas de fondo tienen la misma composición, pero difieren en la granulometría y en la forma de las partículas. Las partículas de las cenizas de fondo son angulosas, mientras que en las cenizas volantes son principalmente esféricas. Por otra parte, las cenizas de fondo están totalmente fundidas mientras que las cenizas volantes sólo lo están parcialmente. Al igual que ocurre con las cenizas volantes, la [Lista Europea de Residuos](#) considera que las cenizas de fondo procedentes de la combustión de fuelóleo o de la incineración de residuos son residuos peligrosos, mientras que las cenizas de fondo procedentes de las centrales térmicas no.

- Escorias de horno alto. Se obtienen en los hornos altos de las factorías siderúrgicas integrales, durante la fabricación del arrabio ([Ballester et al., 2003](#)).

En función de la velocidad de enfriamiento llevado a cabo a la escoria fundida, puede dividirse en:

- Escorias granuladas. Se obtienen por enfriamiento rápido mediante chorros de agua. Se destina principalmente a la industria del cemento ([Lausín González, 2014](#)).
- Escorias cristalizadas. Se obtienen a través de un enfriamiento lento. Se utiliza en las capas de base y sub-base de las carreteras ([Lausín González, 2014](#)).

La [Lista Europea de Residuos](#) no considera a las escorias de horno alto como residuos peligrosos.

- Escorias LD. Se obtienen en los convertidores BOF (Basic Oxygen Furnace) de las acerías LD (Linz-Donawitz), durante la fabricación del acero ([Ballester et al., 2003](#)). Las escorias de LD no son consideradas residuos peligrosos en la [Lista Europea de Residuos](#).
- Escorias EAF y escorias LF. Estos residuos son obtenidos, respectivamente, en las acerías eléctricas y durante la metalurgia secundaria ([Ballester et al., 2003](#)). Las escorias EAF (Electric Arc Furnace) son también conocidas como escorias negras. Por su parte, las escorias LF (Ladle Furnace), también denominadas escorias blancas, se obtiene en el horno cuchara. La [Lista Europea de Residuos](#) considera que las escorias negras y las escorias blancas, incluso las resultantes de la fabricación de aceros inoxidables, no son residuos peligrosos.
- Microsílice. También llamado humo de sílice. Es un residuo de color gris oscuro que se origina en la producción de silicio y ferrosilicio, mediante la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico ([Alonso Domínguez, 2015](#)). Está formado, principalmente, por SiO₂ amorfo y tiene propiedades puzolánicas por lo que reacciona con la portlandita que se ha formado durante la hidratación del cemento. La microsílice está formada por partículas esféricas de tamaño muy pequeño que se recogen mediante filtros electrostáticos o mediante filtros de mangas y, de acuerdo a la [Ley Europea de Residuos](#), no se considera un residuo peligroso.
- Residuos mineros. Se les considera tanto a los estériles generados durante la etapa de laboreo como a las colas procedentes de la planta de tratamiento. La [Lista Europea de Residuos](#) solo considera peligrosos los residuos procedentes de actividades donde se utilizan sales cianuradas.

- Residuos de Construcción y Demolición. Son residuos que incluyen desde fragmentos de vidrio hasta plástico, pasando por madera. Pero en los rellenos geotérmicos se utilizarán únicamente los que tengan origen pétreo, formados principalmente a partir de hormigones, morteros o productos cerámicos. La [Lista Europea de Residuos](#) no los considerara residuos peligrosos.

2.5.2.2 Cemento

Es el conglomerante utilizado en los rellenos geotérmicos. Existen tres clases de cemento, siendo el más utilizado el conocido como cemento Portland, el cual se obtiene a partir de un producto intermedio llamado clinker de cemento Portland.

El Clinker de cemento Portland se produce durante la cocción, generalmente en hornos rotatorios, a una temperatura de unos 1.450 °C para el cemento gris y unos 1.600 °C para el cemento blanco, de una mezcla en unas proporciones preestablecidas de calizas y arcillas comunes. Además, se añaden como correctores arenas, bauxitas, mineral de hierro o cenizas de la tostación de las piritas. Posteriormente el clinker es mezclado con yeso (sulfato cálcico dihidratado, hemihidratado, anhidro o una mezcla de estos), que actúa como retardador del fraguado, y sometido a un proceso de molienda del cual resulta el cemento Portland.

Por otra parte, el cemento Portland se divide en cemento gris y cemento blanco. Este último consigue su color porque se obtiene a partir de caolín y calizas muy puras, con alto contenido en carbonato cálcico y un muy bajo contenido en óxidos de hierro.

Además del cemento Portland, existen otras dos clases de cementos, que son el cemento natural y el cemento de aluminato de calcio o cemento aluminoso. El cemento natural se obtiene a partir de margas y se clasifica en cemento rápido y cemento lento. Por su parte, el cemento aluminoso está compuesto únicamente por clinker de cemento de aluminato de calcio, obtenido a partir de una mezcla definida de caliza y bauxita. El cemento aluminoso tiene un color tan oscuro (casi negro) debido a la presencia de hierro, el cual hace que no se puedan emplear hornos rotatorios en la cocción, por lo que se utilizan hornos eléctricos y una temperatura de cocción de unos 1.600 °C ([Vian Ortuño, 1994](#)).

2.5.2.3 Agua

El agua es el fluido utilizado en el amasado de los rellenos geotérmicos. Deben emplearse aguas sancionadas como aceptables por la práctica. La utilización de agua potable parece en principio condición suficiente, pues carecerá, por tanto, de sustancias incompatibles con el resto de los componentes y/o de elementos perjudiciales para las aguas subterráneas y el terreno circundante. Sin embargo, muchos autores y asociaciones consideran que el análisis

debe ser obligatorio, pues el hecho de ser potable no asegura la ausencia de sales perjudiciales para el relleno geotérmico.

2.5.2.4 Aditivos

Los aditivos son aquellos productos que, incorporados antes del amasado o durante el mismo en una proporción no superior al 5 % del peso del conglomerante, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento ([Bustillo y Calvo, 2005](#)).

Los principales tipos de aditivos que se añaden a los morteros del relleno geotérmico son los superplastificantes, los acelerantes, los retardantes y los hidrofugantes.

- Superplastificantes. Son aditivos que, sin modificar la consistencia, permiten reducir el contenido de agua o que, sin modificar el contenido de agua, aumentan la docilidad. Además, reducen la permeabilidad y mejoran la resistencia mecánica, la adherencia y la durabilidad del relleno. Se comenzaron a utilizar en los años 60 del siglo XX y con ellos se consigue disminuir hasta un 40 % la cantidad de agua necesaria para el amasado ([Bustillo Revuelta, 2008](#)).

Son productos orgánicos de molécula larga, tensoactiva. Al poseer estas moléculas un extremo hidrófilo y otro hidrófobo, quedan absorbidas y orientadas en la superficie de los granos, de lo que resulta un efecto lubricante y una dispersión de las partículas, que pueden ser así mojadas con una cantidad mínima de agua ([Jiménez Montoya et al., 2000](#)).

Se clasifican en:

- Lignosulfonatos. Son la primera generación de superplastificantes y se obtienen a partir de un subproducto de la industria de la celulosa.
 - Naftalenos. Forman la segunda generación y se obtienen de la destilación del alquitrán procedente de la pirólisis de la hulla.
 - Vinilos. Son la tercera generación y se obtienen del refinado del petróleo.
 - Policarboxilatos. Son la última generación y también se obtienen del refinado del petróleo.
- Acelerantes. Estos aditivos, también llamados aceleradores, reducen el tiempo de fraguado o el tiempo de endurecimiento. Se utilizan excepcionalmente, cuando el tiempo es muy frío, para conseguir que el relleno geotérmico adquiera resistencia más

rápidamente, contrarrestando el efecto retardador que producen las bajas temperaturas.

Se clasifican en:

- Silicatos. Son la primera generación de acelerantes y ya no se usan.
 - Aluminatos. Son la segunda generación y los más usados en España.
 - Libres de álcalis. Son la última generación y los más utilizados en la mayor parte de los países europeos.
- Retardantes. A estos aditivos también se les llama retardadores. Tienen el objetivo contrario que los acelerantes.
 - Hidrofugantes. Reducen la absorción del agua por capilaridad, dando así al relleno un mayor grado de impermeabilidad.

2.5.2.5 Otros componentes

Se incluyen aquí otros materiales que se pueden utilizar en un relleno geotérmico con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales.

A estos materiales se les llama adiciones, destacando los siguientes:

- Bentonita. Es una roca arcillosa formada, principalmente, por la alteración química de cenizas volcánicas, y que está compuesta por minerales del grupo de la esmectita, especialmente la montmorillonita, que es un mineral formado por silicatos de aluminio hidratados ([Galán Huertos et al., 2003](#)). Los dos principales tipos de bentonita son, en función de su capacidad de hinchamiento en agua, la bentonita sódica (natural o activada) y la bentonita cálcica. La primera es altamente hinchable mientras que la segunda es poco hinchable ([García Guinea y Martínez Frías, 1992](#)).
- Fibras. Son materiales que tienen una elevada relación entre la longitud y el grosor, siendo este además muy pequeño. Pueden ser de origen inorgánico, como las fibras de acero y las fibras de vidrio, o de origen orgánico, como las fibras de polipropileno. Debido a la mayor conductividad térmica, preferiblemente, se utilizan fibras de acero en los rellenos geotérmicos.
- Magnesia. Es un compuesto sólido de color blanco que está formado por óxido de magnesio (MgO) y que se obtiene, principalmente, a partir del cloruro de magnesio del agua del mar o mediante la calcinación de la magnesita, aunque también existe en la

naturaleza como un mineral llamado periclasa. La magnesia tiene una conductividad térmica elevada, a temperatura ambiente es de 37,7 W/m·K ([Callister, 2007](#)).

- Grafito. Es un polimorfo del carbono con una conductividad térmica muy elevada, superior a 100 W/m·K a temperatura ambiente ([Callister, 2007](#)). El grafito puede ser un mineral nativo, o bien ser una sustancia artificial fabricada en hornos eléctricos a partir de antracita o coque de petróleo, principalmente ([Cornelis y Cornelius, 1997](#)).
- Virutas de aluminio. El aluminio tiene una conductividad térmica muy elevada, del orden de 216 W/m·K a 20 °C.
- Alúmina. Es un sólido blanco de composición Al_2O_3 , que en la naturaleza se obtiene del corindón y de forma sintética se obtiene a través del proceso Bayer, si su destino es la metalurgia del aluminio, o por calcinación de la bauxita si se destina a la industria de los abrasivos y refractarios. En cualquier caso, se parte de la bauxita, que es una roca sedimentaria formada, mayormente, por gibbsita, diásporo y boehmita, siendo estos tres minerales hidróxidos de aluminio ([Sancho et al., 2003](#)). La alúmina tiene un valor de la conductividad térmica elevado, en concreto a temperatura ambiente es de 30,1 W/m·K ([Callister, 2007](#)).
- Espato flúor. Es el nombre comercial que recibe el concentrado de mineral de fluorita. Puede ser de grado ácido, metalúrgico o cerámico, según se destine a la fabricación de ácido fluorhídrico, se use como fundente en la industria metalúrgica o se use en la industria del vidrio y cemento respectivamente, y siendo el más puro en fluoruro de calcio (CaF_2) el de grado ácido y el de menor pureza el de grado metalúrgico ([Luque Cabal et al., 2009](#)).
- Carburo de silicio. Es un compuesto artificial que se obtiene en un horno eléctrico, fundiendo a 2.000 °C una mezcla de arena silíceo y coque de hulla, principalmente. El carburo de silicio tiene una conductividad térmica elevada, con un valor a temperatura ambiente de 41,9 W/m·K ([Richerson y Edward, 2005](#)).
- Nanosílice. Es un compuesto sintético de color blanco, formado, principalmente, por SiO_2 amorfo ([Alonso Domínguez, 2015](#)). Se caracteriza por una pureza y superficie específica muy superior a la de la microsílice, lo que implica una reactividad de la nanosílice también muy superior. La nanosílice tiene propiedades puzolánicas por lo que reacciona con la portlandita formada durante la hidratación del cemento. Las nanopartículas (tamaño < 100 nanómetros) de sílice o nanosílice tiene efecto sobre la cinética de la hidratación del cemento, acelerando los procesos de hidratación del cemento, y sobre la porosidad de los productos hidratados, ya que la formación de gel C-S-H secundario produce un efecto relleno que reduce la cantidad y tamaño de los poros. Los procesos industriales más utilizados para obtener nanosílice son el método

sol-gel, el método pirogénico y el método de precipitación. La nanosílice obtenida puede ser principalmente coloidal o en polvo ([Moreno Bazán, 2018](#)).

2.5.3 Los tipos de rellenos geotérmicos más utilizados

Tradicionalmente, los rellenos geotérmicos más comúnmente usados en los sondeos de muy baja temperatura son la arena silíceas, los detritus de perforación, la bentonita, la pasta de cemento, el mortero de cemento con bentonita y el mortero de cemento con arena. Sin embargo, en los últimos años son los morteros geotérmicos comerciales los que mayormente se utilizan. A continuación, se describen los tipos de rellenos geotérmicos más usados, tanto convencionales como comerciales.

- Arenas silíceas. Son aquellas formadas por más de un 50 % de sílice (SiO_2). La mayor producción se obtiene en areneros y graveras, a partir de depósitos de materiales poco o nada consolidados y en este caso se extraen mediante el uso de dragas, dragalinas, cargadoras y excavadoras con equipo frontal o retro. Igualmente pueden obtenerse en canteras, generalmente mediante el uso de explosivos, a través de la explotación de rocas sedimentarias detríticas, como las areniscas, o de rocas metamórficas como las cuarcitas.
- Detritus de perforación. También llamados ripios de perforación, son los fragmentos de roca que se obtiene al realizar el sondeo geotérmico.
- Bentonita. Los rellenos de bentonita son mezclas de bentonita con agua.
- Pasta de cemento. Se obtiene al amasar cemento con agua. Generalmente, se utiliza cemento Portland gris y se suelen incorporar aditivos.
- Mortero de cemento con bentonita. Se obtiene al amasar cemento con bentonita y agua. Generalmente, se utiliza cemento Portland gris y se suelen incorporar aditivos.
- Mortero de cemento con arena. Suele utilizarse una mezcla de cemento, árido fino y agua. Generalmente, el cemento utilizado es Portland gris, el árido es arena silíceas y se suelen incorporar aditivos.
- Morteros geotérmicos comerciales. Se trata de morteros mejorados térmicamente y, por tanto, suelen tener conductividades térmicas mayores que la de los rellenos convencionales tradicionalmente utilizados. Hoy día son muchas las empresas que comercializan morteros especialmente formulados para ser usados en los sondeos geotérmicos. Se venden a granel o en sacos, normalmente de 15 o 25 kg, donde todos sus componentes ya vienen predosificados.

3. REVISIÓN DEL “ESTADO DEL ARTE”

Se ha realizado una continua recopilación y un seguimiento actualizado de los artículos y otras publicaciones que han tenido lugar, principalmente, en congresos y revistas de reconocido prestigio.

Este capítulo se ha dividido en tres apartados.

En el primero se lleva a cabo una revisión de los principales métodos de medida de la conductividad térmica existentes, clasificándolos en estacionarios y transitorios.

El segundo apartado se centra en el método THW, exponiendo sus características y los equipos de medida que hasta la fecha han sido desarrollados.

En el tercer apartado se abordan con profusión los rellenos geotérmicos, detallando sus propiedades, funciones y características, así como los rellenos geotérmicos que hasta ahora se han utilizado y desarrollado.

3.1 Métodos de medida de la conductividad térmica

Es importante señalar que ningún método es adecuado para todos los tipos de materiales y condiciones, siendo unos métodos más adecuados que otros en función de varios criterios: Tamaño y forma de la muestra, material de la muestra, intervalo de temperaturas, rango de conductividad térmica de la muestra, etc. Igualmente, destacar que al medir la conductividad térmica de una muestra hay diferencias en el valor obtenido cuando se utilizan diferentes métodos ([Wulf et al., 2007](#)).

Se describen a continuación los métodos de medida de la conductividad térmica más usados y reseñables, dividiéndose estos en estacionarios y transitorios.

Según Llavona ([1995a](#), [1995c](#)), al comparar los métodos transitorios con los estacionarios se puede decir que los primeros:

- ✓ Son más rápidos.
- ✓ Los gradientes de temperatura necesarios durante la medida son más pequeños.
- ✓ Generalmente precisan un tamaño de muestra más pequeño.
- ✓ Utilizan expresiones matemáticas más complejas.

- ✓ En general tienen aplicación para un rango de temperaturas mayor.

También [Mohammad et al. \(2016\)](#) señalan que los métodos estacionarios tienen la ventaja de un modelo matemático más simple, pero sin embargo necesitan un tiempo de medida más elevado, mientras que los métodos transitorios son más rápidos, pero en cambio usan modelos matemáticos mucho más complejos. Además, según [Cuenca Martínez \(2013\)](#), los transitorios requieren instrumentación de mayor precisión. Por otra parte, [van Gelder \(1998\)](#) indica que los métodos transitorios son preferibles en los materiales que contienen humedad, debido a que estos pueden experimentar migración de la misma.

3.1.1 Métodos estacionarios

Hasta hace unos 40 años los métodos estacionarios fueron empleados preferiblemente. De acuerdo a [Llavona \(1995a\)](#), estos métodos se han utilizado en los primeros estudios sobre la conductividad térmica, debido probablemente a la menor complejidad de las ecuaciones matemáticas empleadas. También presentan la ventaja de que se pueden utilizar con muestras anisótropas, aunque necesitan un tiempo muy largo para realizar las medidas, y éstas no se pueden hacer a temperatura ambiente.

En la mayoría de los métodos estacionarios se utilizan las fórmulas clásicas para determinar la conductividad térmica de una muestra.

En los métodos de flujo de calor longitudinal, también llamado axial, se analizan muestras con caras paralelas que se introducen en un equipo suficientemente aislado. Más tarde se aplica una cierta cantidad de calor en una de las caras de la muestra hasta que, transcurrido cierto tiempo, se consigue que exista una diferencia de temperaturas constante en la cara opuestas de la pieza analizada. Conociendo la potencia térmica, la superficie y espesor de la muestra analizada, y midiendo el salto térmico, se obtiene directamente la conductividad térmica ([Mosquera Arancibia, 2013](#)). En los métodos de flujo de calor radial las muestras son cilíndricas o esféricas.

A lo largo de los años se han desarrollado muchos métodos estacionarios, destacando los siguientes ([Mosquera Arancibia, 2013](#); [Llavona, 1995a](#); [Tong, 2011](#); [Yoon et al., 2014](#)):

- El método de la Barra de Forbes. Este método fue desarrollado por J. D. Forbes en el año 1851 y consta de una barra cuadrada de hierro que se calienta por un extremo. Posteriormente se determina la distribución de la temperatura a lo largo de dicha barra, obteniéndose finalmente la conductividad térmica.
- El método de la Placa de Sénarmont. Fue desarrollado por H. de Sénarmont entre 1847 y 1848. Se trata de un método directo, con flujo de calor radial y absoluto, que consta

de una placa delgada de muestra que se recubre con una capa delgada de cera blanca, y en donde el calor se produce en un punto central por medio de un tubo caliente.

- El método Cilíndrico. Este método, que algunos autores también llaman método del Hilo Caliente Estacionario y que ya fue utilizado en 1897 por Callendar y Nicolson, utiliza una muestra cilíndrica con un orificio coaxial que contiene un calentador. Es un método directo, con flujo de calor radial y absoluto.
- El método de los Cilindros Concéntricos. En este método se emplean dos cilindros concéntricos, alojando la muestra a ensayar entre ambos cilindros. En el interior del cilindro de menor diámetro se coloca una resistencia calefactora y conociendo la potencia térmica, la longitud de la muestra y las temperaturas a dos distancias radiales se obtiene la conductividad térmica. Aquí la muestra tiene pérdidas de calor por los dos extremos por eso se construyen cilindros tan largos como sea posible, de forma que se pueden considerar de longitud infinita, y así los efectos de borde de la muestra pueden ser despreciados. Es un método directo, con flujo de calor radial y absoluto, que resulta apropiado para la medida de sólidos, líquidos y gases.
- El método de las Esferas Concéntricas. Utilizado por primera vez por Pécelet en 1860. En este método se utilizan dos esferas concéntricas, alojando la muestra a ensayar entre ambas esferas. En el interior de la esfera más pequeña se encuentra alojada una resistencia calefactora y conociendo la potencia térmica, así como la longitud de la muestra y midiendo las temperaturas a dos distancias radiales se obtiene la conductividad térmica. Es un método directo, con flujo de calor radial y absoluto, adecuado para la medición de materiales disgregados principalmente.
- El método de la Caja Caliente Guardada (GHB: Guarded Hot Box). Es un método directo, con flujo de calor longitudinal y absoluto, en el que la probeta se coloca separando dos ambientes sobre los que se controlan las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire, creando un salto térmico a ambos lados de la misma.
- El método de la Caja Caliente Calibrada (CHB: Calibrated Hot Box). Es un método directo, con flujo de calor longitudinal y absoluto, donde la probeta divide un recinto bien aislado del exterior, quedando dos zonas con diferentes temperaturas. Se minimizan también las pérdidas por el perímetro de la muestra. La potencia total suministrada debe compensar las pérdidas por las paredes de la caja y por el perímetro de la muestra. Para conocer dichas pérdidas se utilizan probetas-patrón de conductividad térmica conocida.
- El método Comparativo (CCB: Comparative Cut Bar). Aunque no es un método muy implementado en los equipos comerciales, es un método utilizado en muchos centros de investigación. Se trata de un método directo, con flujo de calor longitudinal y

comparativo, con el que pueden medirse valores de conductividad térmica en el rango 0,20 - 200 W/m·K y con un intervalo de temperaturas de 100 – 1.300 K. Este método es útil para la medida de materiales refractarios, cerámicos, metálicos o plásticos. Las muestras suelen ser semicilíndricas, en torno a los 50 mm de diámetro y 25 mm de altura, o bien paralelepípedas de 50 mm x 25 mm x 15 mm y se coloca entre las dos probetas de referencia. Se hace pasar un flujo de calor por diferencia de temperaturas entre las caras de los extremos y en condiciones ideales se considera que el flujo de calor que atraviesa la muestra es igual que el que atraviesa cualquiera de las dos referencias. Se colocan termopares en las caras de las probetas. Para obtener resultados precisos es necesario tener patrones de referencia fiables, evitar las pérdidas radiales y reducir la resistencia de contacto entre las muestras. El tiempo de medida es de varias horas. Es un método estandarizado según la norma ASTM E1225.

- El método de la Placa Caliente Guardada (GHP: Guarded Hot Plate). Actualmente es uno de los métodos más empleados para la medida de plásticos, hormigón, vidrio, aislantes térmicos y, en general, sólidos con una conductividad térmica en el rango 0,002-2 W/m·K y con un intervalo de temperaturas de 80- 900 K. Se trata de un método directo, con flujo de calor longitudinal y absoluto en el que se utilizan dos probetas iguales, simétricamente colocadas respecto a una placa calefactora central, y dos placas frías por el exterior de forma que estén sometidas al mismo gradiente de temperaturas. Las placas frías tienen serpentines por donde circula el agua. Las dos probetas y las tres placas están confinadas en una caja paralelepípeda con alto aislamiento térmico para minimizar el intercambio térmico con el exterior, de forma que se garantiza que la casi totalidad del calor generado atraviesa el material a medir. Las probetas a medir deben tener la misma superficie que las placas.

En este método el tiempo de medida es de varias horas y las muestras usadas son grandes, generalmente tienen sección cuadrada de 300 o 600 mm de lado y un espesor mayor de 75 mm, aunque también existen equipos para muestras semicilíndricas de más de 200 mm de diámetro. Cuanto mayor es la superficie de la muestra más exacto será el resultado porque se elimina el efecto de borde. Para conseguir un contacto íntimo entre las placas y las muestras se puede ejercer presión. En el centro de las caras de las probetas y a ambos lados de las mismas se colocan los termopares. Una vez que el flujo de calor es constante, se determina la conductividad térmica de la muestra al conocer la potencia eléctrica suministrada a la placa caliente central, el espesor de la probeta, el área de la cara de la probeta en contacto con la placa caliente y la temperatura de las placas fría y caliente.

En este método es muy importante la planicidad, pulido y paralelismo de las caras de las probetas. Por último, comentar que se trata de un método estandarizado bajo las normas ISO 8302, UNE-EN 12667, DIN-EN 12667 y ASTM C177.

- El método del Medidor de Flujo de Calor (HFM: Heat Flow Meter). Hoy en día es uno de los métodos más utilizados para medir la conductividad térmica de polímeros, cerámica, metales, vidrio, caucho y, en general, sólidos con conductividad térmica en el rango $0,002 - 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y con un intervalo de temperaturas de $253 - 400 \text{ K}$. Es un método directo, con flujo de calor longitudinal y comparativo, en el que la muestra se coloca entre dos platos, entre los que se establece un gradiente de temperatura. El flujo de calor a través de la probeta se determina con un medidor de flujo de calor, que se coloca entre la muestra y la placa fría. Es por esto que se considera un método comparativo, pues el flujo de calor se obtiene por comparación con un material de referencia certificado, con el que previamente se calibra el aparato.

El tiempo de medida es de varias horas y las muestras usadas también son grandes, generalmente de sección cuadrada, con 305 mm de lado y 100 mm de espesor, aunque para los polímeros suelen utilizarse probetas cilíndricas. Para conseguir un contacto íntimo se puede colocar una carga para ejercer presión. La conductividad térmica de la muestra se determina al conocer el espesor de la misma, el gradiente térmico y el flujo de calor medido con el sensor, al cual se le ha aplicado un factor de calibración. Es un método estándar, según las normas ISO 8301, UNE-EN 12667, DIN-EN 12667 y ASTM C518.

- El método del Medidor de Flujo de Calor Guardado (GHFM: Guarded Heat Flow Meter). El principio de medida es casi el mismo que sigue el método del Medidor de Flujo de Calor, ya que sólo se diferencia en que la muestra está rodeada por un aislamiento térmico para reducir las pérdidas de calor a través de los bordes de la muestra y así reducir las causas de error en la medida. Pero con este método las probetas tienen menores dimensiones y tiempos de medida y además se pueden medir valores de la conductividad térmica de hasta $40 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ con temperaturas máximas de 600 K .

3.1.2 Métodos transitorios

A lo largo de los años han sido muchos los métodos transitorios desarrollados, entre los cuales destacan los siguientes ([Mosquera Arancibia, 2013](#); [Llavona, 1995b](#); [Llavona, 1995c](#); [Tong, 2011](#); [Mohammad et al., 2016](#); [van Gelder, 1998](#)):

- El método del Hilo Caliente Transitorio (THW: Transient Hot Wire). Este método es actualmente uno de los más usados para la medida de un gran número de sólidos, líquidos y gases, con una conductividad térmica en el rango $0,02-20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y con un intervalo de temperaturas de $273-1.800 \text{ K}$. Es un método directo, con flujo de calor radial y absoluto en el que, generalmente, se usan dos probetas iguales, con forma paralelepípeda o semicilíndrica y con dimensiones centimétricas. El tiempo de medida dura segundos, en el caso de fluidos, o minutos si se ensayan materiales sólidos. Es un método estandarizado para los refractarios.

- El método Fitch. En este método, desarrollado por Fitch en el año 1935, la muestra se coloca entre dos bloques de cobre. El bloque de la parte superior sirve como base de un mejor aislamiento mientras que el bloque de la parte inferior es de masa conocida y está empotrado en el aislamiento. Para determinar la conductividad térmica es necesario conocer la masa y el calor específico del bloque de cobre.
- El método de la Aguja Térmica (TNP: Thermal Needle Probe). El principio es similar al del método THW, pues ambos se basan en el mismo modelo matemático. El método de la Aguja Térmica consiste en calentar una aguja metálica por medio de una corriente eléctrica que proporciona calor constante durante un periodo de tiempo, e ir midiendo la variación de temperaturas. En su versión más actual a la fase de calentamiento se le añade una fase de enfriamiento de igual duración lo que ayuda a eliminar errores. A diferencia del método THW, la sonda queda embebida en la muestra sin atravesarla de lado a lado.
- El método de la Tira Caliente Transitoria (THS: Transient Hot Strip). Este método es similar al método de la Aguja Térmica, pero con una sonda con forma de tira alargada y plana que se introduce entre dos probetas para obtener la conductividad. Así se consigue emitir más cantidad de calor y un mejor contacto con la muestra, si bien tiene el inconveniente de una mayor sección y, por tanto, una menor resistencia eléctrica, lo que hace que el aumento de temperatura en la muestra sea menor.
- El método del Puente Caliente Transitorio (THB: Transient Hot Bridge). Se desarrolla a partir del método de la Tira Caliente Transitoria, para evitar sus inconvenientes. Se trata de crear un desequilibrio térmico en el interior de la muestra provocado por un calentamiento no uniforme. Se utilizan varias resistencias eléctricas que producen un aumento de temperatura con un perfil simétrico en un eje preferente. Se crea un eje donde la temperatura alcanza un pico máximo respecto a las temperaturas de los dos ejes próximos, situados simétricamente, con una separación de escasos milímetros. Esta diferencia de temperaturas desequilibra el puente y origina una diferencia de potencial eléctrico con el que se puede medir la conductividad y difusividad térmica simultáneamente.
- El método de la Bola Caliente (HBM: Hot Ball Method). En este método se mide la conductividad térmica usando una pequeña bola, que sirve a la vez de calentador y termómetro. Se produce un calentamiento constante de la bola que se transmite a la muestra por contacto directo y se mide la respuesta térmica del material. Este método, matemáticamente, se basa en el efecto de calentamiento que produce una esfera hueca en un medio infinito.

- El método de la Fuente Plana Transitoria (TPS: Transient Plane Source). Este método, también conocido como método del Disco Caliente o Hot Disk, fue desarrollado por Gustafsson en el año 1967, y es hoy en día uno de los más usados para la medida de rocas, suelos, hormigones, madera y metales, con una conductividad térmica en el intervalo 0,01 - 500 W/m·K y con un rango de temperaturas de 50 – 1.000 K. Es un método directo, transitorio y absoluto con el que se obtiene simultánea la difusividad y la conductividad térmica empleando un disco plano y delgado que actúa como fuente de calor y, al mismo tiempo, sensor que mide el incremento de temperatura que se produce en el propio disco. Este disco tiene en su interior una doble espiral de níquel por la que se hace circular una corriente eléctrica. El disco se coloca en contacto entre las dos probetas a ensayar y se recubre con un aislante eléctrico, de tipo polimérico o mica, posibilitando así su uso en materiales que sean conductores eléctricos.

Este método se puede emplear con materiales anisótropos. El tiempo de medida es muy pequeño, de unos pocos segundos, y las dos probetas serán iguales, o bien semicilíndricas o bien paralelepípedas. Las muestras tendrán las caras planas y pulidas de forma que existe un buen contacto entre las dos probetas, el cual se puede aumentar haciendo presión. Es un método estandarizado bajo la norma ISO 22007.

- El método Flash. Este método ha sido desarrollado en el año 1961 por Parker y sus colaboradores y es uno de los métodos más empleados hoy en día para medir materiales cerámicos, metales, líquidos y plásticos, con una conductividad térmica en el intervalo 0,1-1.500 W/m·K y con un rango de temperaturas de 100-3.300 K. Este método se basa en hacer incidir sobre la superficie de una probeta cilíndrica de 10 mm de diámetro y 3 mm de altura, aislada térmicamente, un impulso de energía de alta intensidad y corta duración.

Cuando el rayo láser incide sobre la base de una muestra cilíndrica, se produce una onda plana de temperatura que se propaga a través del eje del cilindro y por medio de un sensor de temperatura, que no mantiene contacto físico con la probeta, se sigue la evolución térmica de la cara posterior de la probeta. Luego, mediante la curva de temperatura-tiempo se puede conocer la difusividad térmica y, a partir de la misma, conociendo el calor específico y la densidad, se obtiene la conductividad térmica. Se trata de un método indirecto, transitorio y absoluto.

En este método se utilizan tiempos de medida muy pequeños, normalmente segundos. A lo largo de los años se han ido introduciendo modificaciones, como el control remoto de temperatura mediante un pirómetro óptico o de infrarrojos, que sustituyen a los termopares. El control remoto tiene una serie de ventajas sobre los termopares, entre las que podemos resaltar: evita los contactos y las pérdidas por conducción en los hilos del termopar, elimina el ataque de los materiales a los hilos del termopar y el tiempo

de respuesta es inferior. Al utilizar un control remoto, el incremento de la temperatura es más pequeño y la muestra, por tanto, debe ser pequeña. Se trata de un método preciso que sólo puede emplearse con materiales opacos. Pero, sin embargo, debido a que no se utiliza la corriente eléctrica como fuente de calor sino un haz de luz, puede usarse con materiales que tengan alta conductividad eléctrica. Este método también puede utilizarse con materiales anisótropos. Es un método estándar, bajo la norma ISO 18755 DIN-EN 821 y ASTM E1461.

- El método 3-Omega. Fue desarrollado por David G. Cahill en 1990. La conductividad térmica se determina usando un calentador metálico delgado en contacto directo con la muestra. Este calentador, que también se utiliza como termómetro, está conectado a una fuente de alimentación de corriente alterna. Este calentador se excita a una frecuencia ω y esta excitación genera una respuesta del voltaje de frecuencia 3ω , de ahí el nombre del método. El incremento del voltaje se usa para determinar el incremento de temperatura con el tiempo, y a partir de ahí calcular la conductividad térmica de la muestra. Es un método muy usado cuando la muestra es una lámina delgada.
- El método Modificado de la Fuente Plana Transitoria (MTPS: Modified Transient Plane Source). En este método, desarrollado por Nancy Mathis en el año 2002. Una corriente conocida es aplicada al elemento calefactor del sensor, proporcionando de este modo una pequeña cantidad de calor que da como resultado un incremento de temperatura en la interfase entre el sensor y la probeta. Este incremento induce un cambio en la caída del voltaje del elemento sensor y es utilizado para determinar, indirectamente, la conductividad térmica de la muestra. Con este método el tamaño de muestra y tiempo de medida se reducen respecto al método de la Fuente Plana Transitoria y se pueden medir conductividades térmicas de hasta 100 W/m·K, con temperaturas máximas de 500 K.

Cabe destacar que algunos de estos métodos son muy antiguos, pero otros como los métodos HBM, MTPS, THB y 3-Omega se han desarrollado en los últimos 30 años.

3.2 El método del Hilo Caliente Transitorio (THW)

El método THW es un método directo, transitorio, de flujo de calor radial y absoluto. Este método es el más idóneo para la medida de la conductividad térmica de los fluidos y materiales refractarios y, en general, es un método apropiado para muchos materiales cuya conductividad térmica sea menor de 20 W/m·K, tales como vidrios, polímeros, rocas, suelos, hormigones, morteros, alimentos, etc.

3.2.1 Características del método THW y equipos de medida

El método THW se basa en el modelo de la Fuente Lineal Infinita, por lo que se asume que la transferencia de calor es solamente por conducción. Los efectos de la transferencia de calor por convección se pueden considerar despreciables, mientras que, para la transferencia de calor por radiación, muy importante a altas temperaturas, existe una corrección analítica en materiales que absorben radiación ([Assael et al., 2010](#)).

El método THW, además de que sólo debería utilizarse con materiales homogéneos e isotrópicos ([Wulf et al., 2007](#)), tiene dos importantes limitaciones ([dos Santos, 2008](#)): los materiales que conducen la electricidad y los materiales de alta conductividad térmica. En el primer caso, la solución pasa por aislar eléctricamente el hilo de calentamiento de las muestras. Mientras que, en el segundo caso, se requieren muestras de grandes dimensiones, lo cual dificulta la realización del ensayo, restando operatividad al método.

Por otra parte, este método solamente es aplicable a materiales opacos o idealmente transparentes ([Coquard et al., 2006](#); [Daouas et al., 2008](#)).

El modelo matemático del método THW asume unas condiciones ideales ([Franco, 2007](#); [Zhang et al., 2015](#)):

- ✓ La fuente de calor es una línea recta, de longitud y conductividad térmica infinita, y con una capacidad calorífica nula, que disipa un flujo de calor constante, radial y uniforme.
- ✓ La muestra es homogénea, isotrópica y de tamaño infinito.
- ✓ En el instante en que se inicia el ensayo, la temperatura de la muestra está en equilibrio con la temperatura de la sala.

En la práctica, la fuente de calor ideal es aproximada por un hilo prácticamente recto, de longitud finita, de pequeño diámetro, de elevada conductividad térmica y de baja capacidad calorífica. A su vez, se utiliza una muestra lo más homogénea e isotrópica posible y con unas dimensiones suficientemente grandes.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la determinación de la conductividad térmica puede ser errónea si la muestra no tiene unas dimensiones mínimas o si el tiempo de ensayo es demasiado corto ([Coquard et al., 2006](#)). Igualmente se producen errores causados porque las propiedades termofísicas varían con la temperatura y también los producidos por la convección. Otra fuente de incertidumbre es la debida a la precisión de los dispositivos electrónicos ([dos Santos, 2005a](#)).

Aunque el método THW solamente contempla transferencia de calor por conducción, una gran ventaja del mismo es que permite identificar fácilmente cuando se presenta convección, ya que ésta provoca desviaciones cuando se representa las medidas en escala semilogarítmica.

Inicialmente, el método THW se utilizó para la medida de la conductividad térmica de gases. Más tarde, se aplicó en la medida de líquidos y sólidos. Según [Assael et al. \(2010\)](#) fue Schleiermacher en el año 1888 quien posiblemente desarrolló el primer instrumento, utilizando un hilo de platino de 0,4 mm de diámetro y 32 cm de longitud y con el que determinó la conductividad térmica del aire, el hidrógeno o el dióxido de carbono. Posteriormente, [van der Held y van Drunen \(1949\)](#) empleando un hilo de 0,3 mm de diámetro y un termopar tipo K midieron la conductividad térmica de varios líquidos (alcoholes, ácidos, etc.). Unos años más tarde, será [Hauptin \(1960\)](#) quien lo utiliza por primera vez en materiales refractarios.

Desde entonces, numerosos investigadores han continuado trabajando en la determinación de la conductividad térmica empleando equipos comerciales basados en el método THW. De este modo, [Beziat et al. \(1988\)](#) usaron un equipo Kemtherm QTM para la medida de diferentes arcillas amasadas con agua. [Allan y Philippacopoulos \(2000\)](#), también con un equipo Kemtherm QTM, midieron la conductividad térmica de morteros geotérmicos de base cemento en muestras de 125 mm x 75 mm x 25 mm. [Khan \(2002\)](#) ensayó con un equipo comercial muestras de hormigón y morteros con dimensiones de 120 mm x 120 mm x 40 mm. [Demirboğa \(2003\)](#) mide con un equipo QTM-500 la conductividad térmica de varios morteros en los que utiliza cemento, arena, microsílíce, cenizas volantes y escoria de horno alto. [Esen y Yilmazer \(2010\)](#), con un equipo Kemtherm QTM, midieron muestras de 150 mm x 60 mm x 20 mm de hormigones de alta densidad. [Balo y Yucel \(2013\)](#), también en un equipo Kemtherm QTM, obtuvieron la conductividad térmica de unas muestras formadas por la mezcla de arcilla, cenizas volantes y diferentes aceites vegetales. [Liu et al. \(2015\)](#) han medido con el equipo comercial QTM-D3 la conductividad térmica de morteros de base cemento con unas dimensiones de 160 mm x 40 mm x 40 mm.

Por otra parte, otros investigadores se han dedicado a la construcción de sus propios equipos de medida para la determinación de la conductividad térmica mediante el método THW.

[Ishido et al. \(1982\)](#), con un hilo de calentamiento de 0,3 mm de diámetro y 15 cm de longitud, midieron la conductividad térmica de hidruros en polvo. [Liu et al. \(1990\)](#) utilizando un hilo de 0,127 mm de diámetro, obtuvieron la conductividad térmica de ladrillos de zeolita en muestras de 7 cm de longitud por 3 cm de anchura. [Zhang et al. \(1993\)](#) miden la conductividad térmica a alta temperatura de ladrillos de alúmina y magnesia utilizando un hilo de platino de 108 mm de longitud y 0,35 mm de diámetro. [Griesinger et al. \(1999\)](#) utilizan un equipo con un hilo de platino de 0,2 mm de diámetro para medir muestras de zeolita en estado pulverulento. [Dos Santos y Gregório \(2004\)](#) determinan la conductividad térmica de varios polímeros con un

equipo en el que el hilo de calentamiento y el termopar están situados paralelamente a 15 mm.

[Mounanga et al. \(2004\)](#) miden la conductividad térmica de pasta de cemento fresco con un equipo formado por dos hilos de acero inoxidable de 0,5 mm de diámetro. [Coquard et al. \(2006\)](#) utilizan un equipo formado por un hilo de calentamiento situado a 1 mm de dos termopares para medir sobre muestras de EPS (poliestireno expandido).

[Peralta et al. \(2006\)](#) han diseñado un equipo que consta de dos hilos de platino de diferente longitud, con el que obtienen la conductividad térmica de varios metales fundidos con una incertidumbre del 2 %. [Franco \(2007\)](#) para ensayar morteros y ladrillos de lateritas desarrolló un equipo que presenta una exactitud del 5 % y una precisión de 2-3 % y que está formado por dos termopares tipo T, separados entre sí 50 mm y soldados a un hilo de calentamiento de 0,508 mm de diámetro.

[Daouas et al. \(2008\)](#) miden la conductividad térmica de muestras cilíndricas de PMMA (polimetacrilato de metilo) con un equipo que lleva tres termopares tipo K y un hilo de platino de 200 mm de longitud y 0,3 mm de diámetro. [Ortiz de Zárate et al. \(2010\)](#) usan un hilo de platino de 50 μm de diámetro y 21 cm de longitud con el que miden la conductividad térmica de lodos terapéuticos. [Sales et al. \(2010\)](#) miden la conductividad térmica de hormigones aligerados con serrín utilizando un equipo en el que el hilo de calentamiento y el termopar están separados 16 mm. [Zhang et al. \(2015\)](#) miden la conductividad térmica de materiales porosos empleando un hilo de nicromo de 300 mm de longitud y 0,4 mm de diámetro junto con una termorresistencia Pt100.

[Rixing et al. \(2018\)](#) utilizan un hilo de nicromo de 0,095 mm de radio y termopares tipo K para medir la conductividad térmica de muestras de poliestireno expandido (EPS) y de poliestireno extruido (XPS). [Jannot y Degiovanni \(2019\)](#) obtienen una desviación menor del 3,4 % al medir a alta temperatura la conductividad térmica de materiales de baja densidad, mediante un hilo de nicromo de 0,5 mm de diámetro y un termopar tipo K. [Rottmann et al. \(2020\)](#) miden la conductividad térmica de muestras de perlita expandida, mediante un hilo de platino de 100 μm de diámetro y 8 cm de longitud. Recientemente, [Jannot et al. \(2021\)](#) han medido, utilizando un hilo de nicromo de 0,5 mm de diámetro y dos termopares tipo K, la conductividad térmica de una manta de fibra cerámica, utilizada como aislante térmico de alta temperatura.

A lo largo de los últimos años se han comercializado diversos equipos de medida de materiales sólidos basados en el método THW. Estos equipos se diferencian en el rango de conductividad térmica permitido, la incertidumbre de las medidas o el tamaño mínimo de las muestras. Los equipos comerciales más destacados son:

- Medidor Shotherm QTM-F1. Es un equipo de la firma japonesa Showa Denko K.K. Trabaja en el rango 0 - 15 kcal/(m· h·°C). Tiene una exactitud del 5 % y una precisión del 3 %. El tamaño mínimo de la muestra es 150 mm x 12 mm x 6 mm. Lleva incorporado un horno que le permite trabajar a una temperatura máxima de 900 °C. El peso del equipo es de 330 kg.
- Medidor Kemtherm QTM-D3. Es un equipo de la compañía japonesa [Kyoto Electronics Manufacturing](#). Trabaja en el rango 0,02 - 10 W/m·K. Tiene una precisión del 5 %.
- Medidor Kemtherm QTM-500. Es un equipo de la compañía japonesa [Kyoto Electronics Manufacturing](#). Trabaja en el rango 0,023 - 12 W/m·K. Tiene una exactitud del 5 % y una precisión del 3 %. El tamaño mínimo de la muestra es 100 mm x 50 mm x 20 mm.
- Medidor Kemtherm QTM-700/710. Es un equipo de la compañía [Kyoto Electronics Manufacturing](#). Trabaja en el rango 0,06 - 5 W/m·K. Tiene una exactitud del 5 % y una precisión del 3 %. El tamaño mínimo de la muestra es 100 mm x 50 mm x 20 mm.
- Medidor TCT 426. Es un equipo de la empresa alemana [NETZSCH](#). Puede medir un valor máximo de conductividad térmica de 2 W/m·K. El tamaño mínimo de la muestra es 250 mm x 125 mm x 75 mm. Lleva incorporado un horno que le permite trabajar a una temperatura máxima de 1.250 °C.
- Medidor thw-01S. Es un equipo de la empresa británica [AccuInstruments](#). Trabaja en el rango 0,1 - 4 W/m·K. Tiene una precisión del 2 %.

3.3 Rellenos geotérmicos

En la Figura 4 se muestran los cuatro elementos que intervienen en un sondeo geotérmico de muy baja temperatura: terreno circundante, fluido caloportador, tubería y material de relleno. De estos, los que deben ser considerados con mayor atención son los dos últimos, debido a que pueden ser seleccionados en la fase de proyecto y a que además van a permanecer inaccesibles durante toda la vida útil de la instalación, una vez la obra ha sido ejecutada. Como es lógico, el terreno circundante no podemos seleccionarlo y por tanto sus propiedades dependen de la ubicación de la instalación. Por su parte el fluido caloportador sí puede cambiarse por otro, una vez la instalación ha sido puesta en explotación.

A su vez, desde un punto de vista térmico, la tubería tendría que ser de metal pues tiene valores elevados de conductividad térmica. Sin embargo, en [Sanner et al. \(2003\)](#) se puede observar que para tubos con valores de conductividad térmica por encima de 1 W/m·K se produce muy poca variación en el valor de la resistencia térmica del sondeo. Esto quiere decir que hay relativamente poca relación entre la conductividad térmica de la tubería y la

resistencia térmica del sondeo y, por tanto, en general, el material más idóneo es el plástico, ya que, aunque tenga una baja conductividad térmica, es barato, fácil de instalar y no presenta corrosión.

El polietileno de alta densidad (PEAD), utilizado en la mayoría de instalaciones, tiene un valor de conductividad térmica de 0,4 W/m·K, y aunque utilizando acero o cobre se obtiene una menor resistencia térmica del sondeo, al final no compensa el alto coste de instalación y mantenimiento.

Por todo ello, el elemento más relevante y significativo en los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura es el material de relleno, y muestra de ello es que en los últimos años se observa un mayor interés por el estudio de los materiales de relleno de los sondeos geotérmicos, habiendo actualmente en Europa varios grupos de investigación dedicados al estudio de los rellenos de los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura.

3.3.1 Propiedades de los rellenos geotérmicos

A continuación, se recopila de la literatura técnica aspectos relacionados con las propiedades físicas y mecánicas, así como con la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos.

3.3.1.1 Propiedades físicas y mecánicas

Es sabido que los rellenos geotérmicos deben tener una densidad elevada con el fin de evitar el desprendimiento de las paredes del sondeo y la infiltración de sustancias contenidas en el terreno circundante. No obstante, si la densidad es excesiva puede llegar a producirse un agrietamiento de las paredes del sondeo geotérmico y la consecuente invasión del relleno en el terreno circundante.

De acuerdo a [Borinaga Treviño et al. \(2012\)](#), el relleno endurecido tiene una densidad menor que el relleno fresco, pues parte del agua usada en el amasado de la mezcla reacciona con el conglomerante, parte se evapora, etc. Estos autores obtienen los valores de densidad del mortero endurecido más elevados para relaciones árido/cemento igual a 2. Además, señalan que cuanto menor sea la relación agua/cemento, menor será la porosidad del relleno y, por tanto, mayor será la densidad. [Indacoechea Vega et al. \(2015\)](#) muestran como disminuye la densidad, según se incrementa la proporción de agua en la mezcla.

Los rellenos geotérmicos deben ser más densos que los fluidos de perforación, con el objeto de que estos últimos se puedan extraer fácilmente del sondeo a medida que el relleno se va introduciendo por la parte inferior de la perforación, puesto que la inyección debe expulsar cualquier resto de lodo o detritus que se encuentre en el interior del sondeo. Según [Nuñez](#)

[Becerra \(2007\)](#) la densidad del lodo bentonítico, que es el fluido de perforación más utilizado en la mayoría de las perforaciones profundas, suele tener un valor de unos 1.050 kg/m³.

La granulometría de los rellenos geotérmicos es otro factor a tener en cuenta. Así, [Allan \(2000\)](#), [Borinaga Treviño et al. \(2012\)](#) y [Pascual Muñoz et al. \(2018\)](#) establecen un tamaño máximo del árido de 2 mm para poder garantizar la bombeabilidad del relleno y obtener una adecuada trabajabilidad.

La viscosidad es también otro parámetro muy importante en los rellenos geotérmicos. Estos deben tener una moderada viscosidad para evitar la segregación de los áridos. [De Isabel \(2010\)](#) señala que cuando se emplea un mayor contenido de agua en el amasado, la suspensión obtenida es menos viscosa y, por tanto, más fácil de bombear, condición previa para realizar un relleno sin problemas.

Por otra parte, el empleo de un material de relleno con una cantidad excesiva de sólidos, va unido al riesgo de rellenar de un modo incompleto el espacio anular y, por tanto, no conseguir un relleno homogéneo. Por tanto, para conseguir un relleno geotérmico con la viscosidad necesaria éste debe tener la cantidad de agua y superplastificante correcta, y además el amasado debe ser el adecuado ([Allan, 2015](#)).

Los valores de consistencia y viscosidad determinan la homogeneidad del relleno geotérmico. Además, según [Fernández Pérez et al. \(2010\)](#) también influyen en la presión necesaria en la bomba de inyección, de modo que cuanto más viscoso sea el relleno geotérmico utilizado, más elevadas serán las presiones de bombeo. Para [Young Sang et al. \(2020\)](#) la consistencia de los rellenos geotérmicos medida en la mesa de sacudidas debería ser mayor de 20 cm.

Otro aspecto de gran importancia para la caracterización de un relleno geotérmico es la permeabilidad, siendo deseable que ésta tenga un valor bajo, pero teniendo en cuenta que [Erol y François \(2016\)](#) realizaron ciclos de hielo-deshielo sobre tres rellenos diferentes y concluyeron que, para evitar la posibilidad de formarse grietas en los rellenos, éstos no deben tener permeabilidades extremadamente bajas.

Respecto a la resistencia mecánica, [Borinaga Treviño et al. \(2012\)](#) demuestran, tras estudiar varios morteros de base cemento, que la resistencia a compresión simple de los materiales de relleno decrece a medida que se incrementa la proporción de árido en la mezcla. Estos autores también muestran que, en los morteros de base cemento realizados con árido calizo en vez de silíceo, se consigue mayor densidad, tanto en el mortero fresco como endurecido, y mayor resistencia a compresión simple, tanto a 7 como a 28 días. [De Isabel \(2010\)](#) señala que si el contenido de agua en el amasado es excesivo se reducirá la resistencia mecánica, e incluso puede llegar a no producirse el endurecimiento.

[Fernández Pérez et al. \(2010\)](#) señalan que el material de relleno debe tener una resistencia mínima de 1 N/mm^2 cuando fragua, para que no le afecten las presiones del sondeo. Por su parte, [de Isabel \(2010\)](#), establece que el relleno geotérmico debe alcanzar, cuanto antes, una resistencia mecánica con un valor mínimo de $0,2 \text{ N/mm}^2$ y así ser estable a la erosión causada por el agua. No obstante, en ninguna norma se exige una resistencia mecánica mínima para los rellenos usados en los intercambiadores de calor verticales de los sondeos geotérmicos. Sin embargo, si el relleno geotérmico es usado en los cimientos termoactivos, entonces se requiere una resistencia mecánica similar a la del hormigón estructural, no pudiéndose por tanto utilizarse rellenos de base bentonita ([Borinaga Treviño et al., 2012](#)).

3.3.1.2 Conductividad térmica

La medida de la conductividad térmica es muy difícil y requiere una alta precisión en la determinación de los parámetros involucrados en su cálculo ([dos Santos y Gregório, 2003](#)).

El proceso de transporte del calor a través de un relleno geotérmico es muy complejo debido a la existencia de poros, dentro de los cuales hay aire y/o agua. Se producen, por tanto, mecanismos de conducción, convección y radiación, a los que se añade la influencia del calor latente de vaporización del agua en caso de que haya cambio de estado. Según [Wulf et al. \(2007\)](#), si el tamaño de los poros es lo suficientemente pequeño ($< 5 \text{ mm}$), la contribución por convección es despreciable. Además, debido al rango de temperaturas en el que se trabaja en geotermia de muy baja temperatura y a que los rellenos geotérmicos son prácticamente opacos a la radiación térmica, es posible despreciar la contribución por radiación. Por tanto, en la mayoría de los rellenos geotérmicos sólo se produce transferencia de calor por conducción.

La conductividad térmica es una propiedad que depende de muchos parámetros, tales como la densidad, la temperatura, la forma de las partículas, la porosidad, el contenido de agua o la proporción, composición y distribución de los áridos.

[Hamilton y Crosser \(1962\)](#) afirman que cuando las partículas son redondeadas en vez de angulosas, el valor de la conductividad térmica efectiva decrece. Esto también fue observado por [Côté y Konrad \(2005\)](#). Para [Côté y Konrad \(2009\)](#) la forma de las partículas influye en la conductividad térmica. También se puede observar en [Woodside y Messmer \(1961\)](#) que la conductividad térmica es, generalmente, más alta en los materiales compuestos por agentes cementantes que en los compuestos por partículas sueltas. Según indican [Fernández Pérez et al. \(2010\)](#) la conductividad térmica del relleno también está relacionado con el volumen de poros, el cual se puede rebajar disminuyendo el tamaño del grano.

Por su parte, un mayor contenido de agua de amasado en el mortero reduce asimismo la proporción de sólidos, con la consiguiente disminución de la conductividad térmica ([de Isabel,](#)

2010). También [Allan y Philippacopoulos \(1998\)](#) señalan que la conductividad térmica de la pasta de cemento decrece según aumenta la relación agua/cemento. Igualmente, [Liu et al. \(2015\)](#) y [Daehoon et al. \(2017\)](#) muestran una disminución de la conductividad térmica del mortero de cemento a medida que se incrementa la relación agua/cemento. Para [Allan \(2015\)](#) el aumento de la relación agua/cemento, además de una disminución de la conductividad térmica, tiene otras muchas consecuencias, como el aumento de la retracción, la exudación y la permeabilidad o la reducción de la resistencia mecánica y la durabilidad. También en [Indacoechea Vega et al. \(2015\)](#) se indica que, cuanto mayor sea la relación agua/cemento, menor es la conductividad térmica y la resistencia mecánica y mayor es el coeficiente de permeabilidad.

La conductividad térmica de los rellenos geotérmicos es mayor en condiciones de saturación que en condiciones secas. [Daehoon et al. \(2019\)](#) concluyen que el valor de la conductividad térmica de los morteros de base cemento decrece linealmente con el grado de saturación.

Por otra parte, [Allan y Philippacopoulos \(1999\)](#) señalan que los morteros de base cemento tienen mejor comportamiento térmico que la pasta de cemento. En este sentido, puede verse en [Allan \(2015\)](#) y en [Daehoon et al. \(2017\)](#) que la conductividad térmica aumenta a medida que se incrementa la proporción de arena en el mortero.

[Borinaga Treviño et al. \(2012\)](#) admiten que, en general, añadir áridos a los conglomerantes mejora la conductividad térmica, pero teniendo más influencia el tipo de árido utilizado en la mezcla que su dosificación. A esta misma conclusión llegan [Liu et al. \(2015\)](#).

Destacar que una buena conductividad térmica en los rellenos es importante, pero no es necesario que tome valores muy elevados. Así en [de Isabel \(2010\)](#) se observa que al utilizar un material de relleno con una conductividad térmica de $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ se reduce la longitud del sondeo aproximadamente un 10 % respecto a utilizar un material de relleno de conductividad térmica $1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

[Sanner et al. \(2003\)](#) determinan que es ideal una conductividad térmica con valores próximos a $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y muestran que, si se utilizan rellenos con valores superiores, la resistencia térmica del sondeo por unidad de longitud mejora muy poco, pasando de $0,070 \text{ m}\cdot\text{K/W}$ para la conductividad térmica de $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a $0,060 \text{ m}\cdot\text{K/W}$ para una conductividad térmica de $2,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Sin embargo, señalan que la resistencia térmica del sondeo se reduce casi un 50 % si se utiliza un relleno con conductividad térmica de $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en vez de $0,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

En la misma línea [Fernández Pérez et al. \(2010\)](#) indican que, para poder alcanzar un valor óptimo entre la conductividad térmica del relleno y la resistencia térmica del sondeo, debe trabajarse con rellenos cuyas conductividades térmicas estén entre $1,8$ y $2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. [Lee et al.](#)

(2010) proponen, para la mayoría de los terrenos, conductividades térmicas del relleno en el rango 1,7-2,1 W/m·K.

3.3.2 Resistencia térmica de contacto en los sondeos geotérmicos. Retracción

Según [Philippacopoulos y Berndt \(2001\)](#), en los sondeos geotérmicos se puede llegar a producir un importante hueco por una desunión del relleno con la tubería y el terreno, perjudicando así el proceso de transferencia de calor al formarse dos resistencias térmicas de contacto, una en la interface relleno-tubería y otra en la interface relleno-terreno circundante. Estos huecos interfaciales pueden surgir por varias razones, tales como la retracción que sufre el relleno, las grietas y fisuras de la formación circundante, la inapropiada técnica de inyección del relleno o los desajustes térmicos ocurridos por la dilatación térmica diferencial de la tubería de PEAD y del relleno, cuando la bomba de calor está en funcionamiento.

[Allan y Philippacopoulos \(1998\)](#) realizaron estudios de la microestructura interfacial entre la tubería en U y las pastas de cemento sin aditivos y con una relación agua/cemento de 0,4 y esas mismas tuberías utilizando morteros de base cemento con aditivos superplastificantes. Dichos estudios revelaron huecos de 0,32 mm de anchura máxima en el primer caso y un valor de 0,075 mm de anchura máxima en el segundo. Por tanto, aunque la unión entre el material de relleno y la tubería no sea perfecta, pues habrá una resistencia de contacto, sí se aprecia una considerable mejora en la transferencia de calor cuando se usan superplastificantes con morteros de base cemento, respecto a utilizar lechadas de cemento sin estos aditivos.

Para analizar la influencia que en la transferencia de calor tienen estos huecos de aire que se producen entre los elementos que forman los sondeos geotérmicos, [Philippacopoulos y Berndt \(2001\)](#) hacen un modelo numérico bidimensional en el que introduce un hueco de aire, entre el relleno y el terreno circundante, con un valor arbitrario de 1,6 mm, y analizan la variación del coeficiente global de transferencia de calor. Estos autores obtienen una reducción del 20 % cuando el hueco es un sector de 90°, del 33 % cuando es de 180° y del 60 % cuando abarca los 360°. Una situación similar ocurre cuando se introduce un hueco de aire de 360° entre el relleno y uno de los dos tubos, obteniéndose en este caso una reducción del coeficiente global de transferencia de calor del 66 %, lo que indica que, para los casos estudiados, la presencia de huecos en la interface relleno-tubería es más significativa que en la interface relleno-formación circundante. Estos huecos, además, facilitan la circulación de agua, por lo que provocan un aumento de la permeabilidad ([Indacoechea Vega et al., 2015](#)).

A su vez, [Fernández Pérez et al. \(2010\)](#) al llevar a cabo ensayos TRT (Test de Respuesta Térmica) comprueban que en algunos sondeos no se ha realizado una correcta inyección del mortero, lo cual produce importantes resistencias de contacto. Por eso, y con el objeto de minimizar los efectos producidos por las resistencias de contacto, es muy importante no sólo utilizar un buen material de relleno, sino realizar una correcta puesta en obra. En este sentido, [Allan \(2015\)](#)

señala que deben seguirse unos adecuados controles de calidad durante todo el proceso, desde el almacenamiento de los materiales hasta el vertido del relleno, pasando por la dosificación y amasado de la mezcla.

Por otra parte, según [Allan y Philippacopoulos \(1999\)](#) los morteros de base cemento sufren mucha menos retracción que los morteros de base bentonita. [Allan y Philippacopoulos \(1998\)](#) llevaron a cabo medidas de retracción de varios rellenos de base cemento con distintas relaciones agua/cemento y después de 90 días de secado en condiciones ambientales, la retracción obtenida fue menor del 0,60 % en todos los casos, alcanzando un valor máximo de 0,59 % en los rellenos de pasta de cemento y de 0,28 % en los morteros de cemento y arena. Este mismo ensayo se intentó realizar en varios morteros de base bentonita, y sin embargo las muestras agrietaron con el secado. También en [Delaleux et al. \(2012\)](#) puede verse la influencia que tiene la retracción de la bentonita en el comportamiento térmico del relleno geotérmico. [Philippacopoulos y Berndt \(2001\)](#) señalan que el uso de morteros geotérmicos con una alta retracción debería ser evitado en condiciones secas.

3.3.3 Funciones y características de los rellenos geotérmicos

Aunque desde un punto de vista térmico es deseable que el relleno sea permeable, pues así habrá transferencia de calor debida a la convección, el no considerar este mecanismo de transferencia de calor nos sitúa del lado de la seguridad a la hora de diseñar la instalación geotérmica. De todas formas, desde el punto de vista legal se exige cierta impermeabilidad con el objeto de no interconectar distintos acuíferos. Además, la circulación de agua a través del relleno geotérmico afecta de manera considerable a su durabilidad del mismo.

Según [Eugster \(2011\)](#), [Indacochea Vega et al. \(2015\)](#) y [Sáez Blázquez et al. \(2017a\)](#) el relleno de los sondeos geotérmicos debe cumplir las siguientes funciones:

- Facilitar el intercambio térmico entre el fluido caloportador y el terreno, con el fin de lograr la mayor transmisión térmica posible.
- Aislar hidráulicamente unas capas geológicas de otras, evitando conectar dos o más acuíferos para no verse modificado el régimen hidrogeológico.
- Sostener las paredes del sondeo geotérmico, garantizando la estabilidad del mismo y evitando el deterioro de la tubería.

Para ello, el relleno geotérmicos debe tener las siguientes características ([de Isabel, 2010](#); [Hellström, 2011](#); [Allan, 2015](#)):

- Alta conductividad térmica. De este modo, mayor será la transferencia de calor, y por tanto mayor será el rendimiento de la instalación geotérmica.
- Suficiente resistencia mecánica. Aunque el relleno del sondeo no tiene una eminente función estructural, si debe tener la resistencia mecánica necesaria como para evitar el colapso de las paredes del sondeo.
- Adecuada consistencia para facilitar la inyección. Debido a que la tubería de inyección es de pequeño diámetro, para evitar obstrucciones en la puesta en obra del relleno, es imprescindible una fluidez adecuada, la cual se consigue con el uso de aditivos superplastificantes, la limitación del tamaño máximo de árido y una correcta relación agua/cemento.
- Densidad superior a la del fluido de perforación. Esto permite extraer el fluido de perforación, a medida que el relleno geotérmico se va vertiendo.
- Baja permeabilidad. La normativa vigente exige que no se pongan en comunicación distintos acuíferos, así pues, se requiere un relleno geotérmico impermeable. De esta manera, si se produjese una fuga a través de la tubería quedaría el fluido caloportador debidamente confinado en el relleno, sin afectar al terreno circundante ni a las aguas subterráneas.
- No producir corrosión ni un excesivo desgaste en los equipos de inyección. El relleno no debe tener componentes corrosivos ni altamente abrasivos.
- Alta homogeneidad. El relleno utilizado debe ser lo más isótropo posible y no presentar segregación o cualquier otra heterogeneidad.
- Buena adherencia a la tubería y a las paredes del sondeo. Deben emplearse materiales capaces de adherirse correctamente a la sonda geotérmica y al terreno circundante, evitando así la formación de películas de aire o agua que reducen la conductividad térmica. La correcta adherencia a la tubería permitirá además soportar la dilatación térmica longitudinal de esta.
- Suficiente durabilidad y estabilidad volumétrica. Los materiales de relleno, una vez endurecidos, no deben degradarse ni variar sus dimensiones a lo largo de su vida útil y, por tanto, no deben presentar grietas, fisuras, ataque por sulfatos, ataque por Reacción Álcali-Sílice (RAS) o retracción apreciable. También debe tener un buen comportamiento frente a los ciclos de hielo-deshielo y humedad-sequedad.
- No contaminar los acuíferos ni los terrenos circundantes. Deben emplearse materiales que no produzcan impacto ambiental.

- Precio reducido y disponibilidad de los materiales empleados. Lo deseable es utilizar un material de relleno que, teniendo buenas propiedades, esté fácilmente disponible y sea barato. Así, su coste apenas repercutirá en el presupuesto final de la instalación geotérmica.

3.3.4 Rellenos utilizados en los sondeos geotérmicos

Tradicionalmente, en los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura, han sido muy usados los detritus de perforación y los rellenos de base bentonita. [Zhang y Murphy \(2000\)](#) llevan a cabo un estudio en el que miden, en tres sondeos diferentes, la conductividad térmica de tres rellenos: uno hecho por detritus de perforación, otro elaborado con bentonita y agua y el tercero hecho con bentonita, agua y arena. Mas recientemente, [Jin et al. \(2019\)](#) realizan un estudio del rendimiento térmico y la viabilidad económica de un relleno a base de detritus de perforación y concluyen que la principal ventaja de su uso es la reducción en el coste de capital.

Según [Allan y Philippacopoulos \(2000\)](#), hasta el comienzo del siglo XXI en los Estados Unidos se utilizaron predominantemente lechadas de cemento y rellenos de base bentonita, en ambos casos con conductividades térmicas próximas a 0,8 W/m·K. De acuerdo a [Philippacopoulos y Berndt \(2001\)](#), los tipos de rellenos geotérmicos comúnmente usados son de base bentonita o de base cemento. [Bose et al. \(2002\)](#) indican que en Norteamérica el material de relleno más utilizado durante muchos años ha sido la bentonita. Sin embargo, [Dehdezi et al. \(2011\)](#) señalan que inicialmente fue muy utilizada la arena sílicea, a causa de su bajo coste. Por su parte, [Indacochea Vega et al. \(2015\)](#) añaden que es muy común adicionar una pequeña cantidad de bentonita a los morteros de base cemento para mejorar algunas de sus propiedades.

[Montaser et al. \(2021\)](#) deducen que el cemento y la bentonita han sido tan utilizados debido a su baja permeabilidad y en el caso del cemento también es consecuencia de su elevada resistencia mecánica. Sin embargo, estos autores señalan que ambos materiales tienen el problema de la baja conductividad térmica e indican que el tipo de cemento más utilizado en los morteros geotérmicos es el cemento Portland.

[Philippacopoulos y Berndt \(2001\)](#) utilizaron rellenos geotérmicos de base bentonita con una conductividad térmica de 0,75 W/m·K. Sin embargo, en los últimos años se han mejorado mucho estos rellenos, así [Lee et al. \(2010\)](#) obtuvieron rellenos de base bentonita con valores de conductividad de incluso 3,5 W/m·K incorporando grafito en la mezcla. También [Delaleux et al. \(2012\)](#) y [Erol y François \(2014\)](#) han utilizado grafito natural para mejorar la conductividad térmica de los rellenos de base bentonita. Más recientemente, [Pascual Muñoz et al. \(2018\)](#) y [Indacochea et al. \(2018\)](#) han utilizado grafito en los morteros geotérmicos de base cemento.

Algunos autores ([Smith y Perry, 1999](#); [Busso et al., 2000](#)) han utilizado morteros hechos de una mezcla de cemento y bentonita con los que han obtenido buenos resultados. Para las mezclas

de cemento y bentonita, [de Juan García \(2006\)](#) establece que el tiempo de fraguado es muy variable en función de la dosificación y tiempo de amasado de la mezcla, pero suele oscilar entre 1 y 10 horas, que la densidad en estado fresco suele oscilar entre 1.100 y 1.300 kg/m³ y que el coeficiente de permeabilidad suele ser del orden de 1·10⁻⁸ m/s. Además, también señala que se suelen utilizar relaciones agua/cemento del orden de 4.

[Allan y Philippacopoulos \(1998 y 1999\)](#) desarrollaron un mortero mejorado térmicamente hecho con una mezcla de cemento Portland, arena silíceo, agua, superplastificante de tipo naftaleno y una pequeña proporción de bentonita sódica para reducir la exudación. Este mortero, denominado Mix 111, ha recibido el visto bueno del Departamento de Protección Medioambiental de New Jersey (EE.UU) y se ha utilizado exitosamente en muchos proyectos comerciales. El mortero geotérmico Mix 111, de relación agua/cemento igual a 0,55, tiene una densidad de 2.180 kg/m³, un coeficiente de permeabilidad de 1,6·10⁻¹² m/s, una resistencia a compresión simple de 36,70 MPa a los 28 días, una resistencia a flexión de 6,35 MPa a los 56 días, una tensión de adherencia a la tubería de PEAD de 150 KPa y una conductividad térmica de 2,16 W/m·K, en condiciones secas.

[Allan y Philippacopoulos \(1999\)](#) utilizando el mortero Mix 111 consiguen una reducción de la resistencia térmica del sondeo de un 29 a 35 % respecto a utilizar un relleno de bentonita, lo cual se traduce en una reducción del 15 % en la longitud del sondeo.

Desde hace unos años, diferentes materiales de relleno de base cemento y de base bentonita han sido ensayados. Sin embargo, el uso de áridos artificiales y reciclados, que contribuyen a la sostenibilidad medioambiental, todavía han sido muy poco estudiados en los rellenos geotérmicos. En este sentido destacan los trabajos llevados a cabo por [Allan \(1997\)](#), [Berndt \(2010\)](#), [Borinaga Treviño et al. \(2012 y 2013\)](#) y [Dequan et al. \(2020\)](#).

[Allan \(1997\)](#) desarrolla dos morteros de base cemento, a los que denomina Mix 109 y Mix 110. El mortero geotérmico Mix 109 es el resultado de la mezcla de cemento Portland, arena silíceo, escorias de horno alto, agua y aditivo superplastificante, mientras que el mortero Mix 110 está hecho con la mezcla de cemento Portland, arena silíceo, cenizas volantes, superplastificante y agua. En ambos casos, la conductividad térmica es de 2,2 W/m·K. En este mismo trabajo, también se ha medido la conductividad térmica de un mortero de cemento con arena silíceo, superplastificante y agua obteniendo un valor de 1,53 W/m·K.

[Berndt \(2010\)](#) muestra que cuando, en los morteros de base cemento, se utilizan escorias de horno alto se produce un ligero incremento de la resistencia a compresión simple y que cuando se utiliza microsilíceo disminuye ligeramente el coeficiente de permeabilidad.

[Borinaga Treviño et al. \(2012\)](#) elaboran cuatro morteros. En cada uno de ellos usan cemento Portland tipo CEM II, agua, aditivo superplastificante y uno de los siguientes áridos: escorias

EAF, arena caliza, arena silíceas y RCD, obteniendo una conductividad térmica de 1,5 W/m·K, 1,8 W/m·K, 2,1 W/m·K y 1,3 W/m·K respectivamente, valores todos ellos mayores que el obtenido para la pasta de cemento, que fue de 0,9 W/m·K y que se usó de referencia. En este trabajo, los autores señalan que usando RCD en los morteros geotérmicos no han obtenido resultados satisfactorios. En un trabajo posterior, [Borinaga Treviño et al. \(2014\)](#) someten a los morteros geotérmicos citados a ciclos de hielo-deshielo, no observándose daños significativos en éstos, de forma que apenas se ven afectadas sus propiedades mecánicas y térmicas.

[Borinaga Treviño et al. \(2013\)](#) utilizan cuatro morteros. Uno de ellos es un mortero comercial con una conductividad térmica de 1,05 W/m·K y compuesto por una mezcla de bentonita, cemento Portland, agua y grafito. Otro es un mortero de conductividad térmica 0,90 W/m·K, formado por una mezcla de cemento Portland, agua, escorias de convertidor BOF, escorias EAF y una pequeña proporción de bentonita. El otro mortero tiene una conductividad térmica de 1,61 W/m·K y está hecho de una mezcla de cemento Portland, agua, arena silíceas y una pequeña proporción de bentonita. El otro mortero tiene una conductividad térmica de 1,16 W/m·K y está compuesto por la mezcla de cemento Portland, agua, RCD, escoria EAF y una pequeña proporción de bentonita. En la confección de estos tres últimos morteros se utilizaron dos aditivos, un superplastificante y un retardante. Por otra parte, en los cuatro morteros se usó cemento Portland tipo III. Excepto en el mortero que utiliza escorias de convertidor BOF como árido, en el resto de morteros la conductividad térmica se reduce drásticamente cuando las muestras se secan en el horno, especialmente el mortero comercial, donde la reducción es superior al 40 %, al tener un importante porcentaje de bentonita.

[Deguan et al. \(2020\)](#) estudia rellenos geotérmicos preparados con colas procedentes de una mina de hierro. También preparan rellenos geotérmicos mezclando las colas de lavadero de la mina de hierro con loess.

Por otro lado, son varios los autores que han utilizado en los morteros geotérmicos minerales industriales, fibras metálicas, compuestos cerámicos o virutas de aluminio. Destacando las investigaciones de [Allan \(1996\)](#), [Allan y Kavanaugh \(1999\)](#), [Berndt y Philippacopoulos \(2002\)](#), [Berndt \(2010\)](#), [Alrtimi et al. \(2013\)](#) y [Sáez Blázquez et al. \(2017a\)](#).

[Allan \(1996\)](#) estudio tres morteros de base cemento, preparados con carburo de silicio, arena más fibras de acero y alúmina más microsílíce, obteniendo, respectivamente, conductividades térmicas de 3,30 W/m·K, 2,64 W/m·K y 3,26 W/m·K.

Por su parte, [Allan y Kavanaugh \(1999\)](#) estudiaron la conductividad térmica de diversos materiales utilizados en los morteros de base cemento, tales como alúmina, carburo de silicio o fibras de acero, y aunque obtuvieron buenos resultados, estos materiales han sido poco utilizados en posteriores investigaciones, principalmente debido a la disponibilidad, al coste y a los resultados no tan satisfactorios de algunas de las propiedades del mortero. Estos autores

consideran que los morteros en los que se utilizan los materiales citados no superan las propiedades de un mortero de cemento y arena.

[Berndt y Philippacopoulos \(2002\)](#) trabajan con morteros de cemento reforzados con fibras y concluyen que al añadir fibras de acero al mortero de base cemento aumenta la densidad, la resistencia mecánica y la conductividad térmica, pero disminuye la consistencia. Años más tarde, [Berndt \(2010\)](#) señala que al añadir fibras de acero a los morteros geotérmicos de base cemento se incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad, mientras que el coeficiente de permeabilidad no se ve afectado.

[Alrtimi et al. \(2013\)](#) prepara un mortero de base cemento en el que utilizan espato flúor y cenizas de fuelóleo pulverizado, obteniendo una conductividad térmica de 2,88 W/m·K.

[Sáez Blázquez et al. \(2017a\)](#) analizan diferentes morteros geotérmicos en los que utilizan cemento de aluminato de calcio que al mezclar con arena sílicea alcanza una conductividad térmica de 2,45 W/m·K. Cuando además adicionan virutas de aluminio, la conductividad térmica medida es de 2,79 W/m·K.

Recientemente, se han comenzado a utilizar en los rellenos geotérmicos Materiales de Baja Resistencia Controlada (CLSM) y Materiales de Cambio de Fase (PCM). Los CLSM son rellenos fluidos de baja resistencia a la compresión y los PCM son materiales que tienen un elevado calor latente, pero una baja conductividad térmica. Es justamente la baja conductividad térmica el mayor inconveniente de utilizar PCM en los rellenos geotérmicos ([Montaser et al., 2021](#)).

[Young Sang et al. \(2018\)](#) preparan un CLSM de aplicación en sondeos geotérmicos en el que emplean cemento, colas de una mina de oro y arena sílicea, consiguiendo una conductividad térmica de 1,57 W/m·K. [Tan Manh et al. \(2019\)](#) evalúan la idoneidad como relleno geotérmico de un CLSM en el que utilizan mezclas de arena sílicea con suelos procedentes de dragados marinos. [Tan Manh et al. \(2020\)](#) comparan con rellenos geotérmicos convencionales diferentes mezclas de CLSM, preparadas con arena sílicea, cemento, agua y cenizas. [Young Sang et al. \(2020\)](#) evalúan las propiedades de varios CLSM en los que emplean cemento, arena, cenizas volantes, agua y escorias siderúrgicas.

[Weibo et al. \(2019\)](#) estudian el comportamiento de varios PCM en los que usan ácidos grasos, como el oleico y el láurico.

Por otra parte, según [Allan \(1996\)](#) es importante destacar que cuando el mortero geotérmico está en contacto con un terreno con gran contenido en sulfatos, deben emplearse cementos resistentes a los sulfatos o, en su defecto, utilizar escorias de horno alto o cenizas volantes. [De](#)

[Juan García \(2006\)](#) sugiere que cuando el relleno geotérmico está en contacto con agua salada, la bentonita utilizada debe ser sódica en vez de cálcica.

Por último, debido a que el relleno geotérmico puede estar en contacto directo con las aguas subterráneas, es muy importante que no sea perjudicial para éstas. Por consiguiente, y antes de emplear un material de relleno determinado, hay que tener absoluta certeza sobre la compatibilidad medioambiental de dicho material de relleno con las aguas subterráneas ([de Isabel, 2010](#)). [Sáez Blázquez et al. \(2017a\)](#) también señalan el impacto ambiental que puede producir el relleno geotérmico sobre el terreno circundante.

3.3.5 Los morteros geotérmicos comerciales

En los últimos años varias empresas han desarrollado morteros geotérmicos con mejores propiedades que muchos de los rellenos tradicionales.

Los morteros geotérmicos comerciales más utilizados en España son los siguientes:

- **MASTEC[®] Geotérmico**. Es un mortero seco, fabricado por el grupo asturiano [Masaveu](#), y formado por la mezcla de mezcla de cemento, arenas silíceas y aditivos. Tiene una conductividad térmica de 1,7 W/m·K, un coeficiente de permeabilidad de 10^{-10} m/s y la resistencia a compresión a los 28 días es de 5 N/mm².
- **EnerGrout HD 2.1**. Es un mortero seco, fabricado por la empresa [Energrout Geotherm](#), y formado por la mezcla de cemento, arenas silíceas y aditivos. Este mortero tiene una conductividad térmica de 2,1 W/m·K, una densidad aparente del mortero fresco de 1.760 kg/m³, un coeficiente de permeabilidad de 10^{-10} m/s y una resistencia a compresión a los 28 días de 3 N/mm².
- **ERKAN GEO**. Es un mortero seco, fabricado por la empresa gallega [TEAIS](#), y formado por la mezcla de cemento, arena silícea y aditivos. La conductividad térmica es de 1,8 W/m·K, la resistencia a compresión a los 28 días es de 6,1 N/mm², el coeficiente de permeabilidad es de $1,5 \cdot 10^{-10}$ m/s y tiene una densidad aparente del mortero fresco de 1.470 kg/m³.
- **ThermoCem[®] PLUS**. Es un mortero seco, mezcla de cemento, bentonita y aditivos, fabricado por la multinacional alemana [HeidelbergCement](#). Tiene una conductividad térmica de 2,0 W/m·K, el coeficiente de permeabilidad es de 10^{-10} m/s, la densidad aparente del mortero fresco es de 1.460 kg/m³, la resistencia a compresión a los 28 días es de 6 N/mm² y para el amasado se deben añadir 0,8 litros de agua por cada kilogramo de mortero.

- PROPAM[®] GEOTHERM. Es un mortero seco, fabricado por la empresa PROPAMSA y formado por la mezcla de cemento, arena silíceo y aditivos. La conductividad térmica es de 1,9 W/m·K, la resistencia a compresión a los 28 días es de 10 N/mm², el coeficiente de permeabilidad es de 3·10⁻¹⁰ m/s y tiene una densidad aparente del mortero fresco de 2.000 kg/m³.
- GWE Thermokontakt[®]. Se trata de un mortero seco fabricado por la empresa PESA WELL ENGINEERING, S.L. Está formado por la mezcla de cemento, arena fina de cuarzo, minerales de arcilla y aditivos. La conductividad térmica es de 1,3 W/m·K, el coeficiente de permeabilidad es de 10⁻⁹ m/s, la resistencia a compresión es de 3 N/mm² y tiene una densidad aparente del mortero fresco de 1.200 kg/m³.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La metodología seguida en el presente trabajo de investigación para la consecución de los dos objetivos principales, el desarrollo de un equipo de medida de la conductividad térmica de rellenos geotérmicos y el desarrollo de un mortero geotérmico, es la siguiente:

1. Se decide, en base a las características reportadas en la literatura, así como a la propia experiencia previa del equipo investigador, que el equipo de medida a desarrollar se base en el método THW, cuyo fundamento matemático es el modelo ILS.
2. En función de las hipótesis y condiciones impuestas por el modelo ILS se seleccionan los materiales, dimensiones, forma y disposición de los distintos componentes utilizados en la elaboración del equipo de medida de la conductividad térmica y de las muestras utilizadas.
3. Posteriormente, se realiza la construcción y montaje del equipo de medida, incluida la Placa de Circuito Impreso (PCB) del registrador de datos y su programación.
4. Después, se utilizan 4 muestras-patrón con conductividades térmicas entre 0,13 y 2,80 W/m·K para llevar a cabo la puesta en marcha del equipo de medida desarrollado. La selección de dichas muestras-patrón con conductividad térmica conocida es debido a que los rellenos geotérmicos tienen conductividades térmicas dentro de ese rango.

Además, para completar la validación del equipo de medida desarrollado, se fabrican 4 muestras de rellenos tradicionalmente usados en los sondeos geotérmicos y se determina su conductividad térmica, utilizando el equipo comercial Shotherm QTM-F1 y el equipo desarrollado.

5. Finalmente, se procede a realizar la calibración del equipo de medida desarrollado.
6. Por otra parte, en base a las propiedades y características de los materiales, a la propia experiencia previa del equipo investigador y a los datos publicados por otros equipos de investigación, se lleva a cabo la selección de los materiales que serán empleados en la elaboración del mortero geotérmico.
7. Posteriormente, combinando diferentes materiales y dosificaciones, se elaboran 30 mezclas iniciales de cuyo análisis surgen 7 morteros geotérmicos candidatos.
8. Más tarde, con el equipo de medida desarrollado en la presente tesis, se determina la conductividad térmica de los 7 morteros candidatos y se decide cuál es el mortero geotérmico definitivo.

9. A continuación, se lleva a cabo una completa caracterización del mortero geotérmico definitivo, realizando un conjunto de ensayos y comparando los resultados obtenidos, con los principales morteros geotérmicos comerciales y con los desarrollados por otros investigadores.
10. Por último, se calcula el coste económico del mortero desarrollado y se compara con el valor de mercado de los principales morteros geotérmicos comerciales.

A continuación, se expone y describe el desarrollo experimental del equipo de medida de la conductividad térmica y del mortero geotérmico.

4.1 Desarrollo del equipo de medida de la conductividad térmica

Se ha desarrollado un equipo de laboratorio, denominado MCT, especialmente diseñado para la determinación de la conductividad térmica en el rango 0,13-2,80 W/m·K, que es típico en los rellenos geotérmicos.

El equipo MCT completo tiene unas dimensiones de 600 mm x 500 mm x 260 mm y un peso de 10 kg, incluyendo el material accesorio. La duración del ensayo depende de la intensidad eléctrica aplicada y de las dimensiones y conductividad térmica de la muestra, pero se ha comprobado que 15 minutos es un tiempo suficiente.

El equipo investigador [Q-Thermie](#) lleva años dedicándose a estudiar las propiedades térmicas de los materiales, destacando los trabajos llevados a cabo por [Alonso Sánchez et.al, 2012](#) y [Rey Ronco et.al, 2013](#).

Hasta ahora, [Q-Thermie](#) ha desarrollado varios equipos de medida de la conductividad térmica, pero todos ellos basados en métodos estacionarios. Sin embargo, para el fin que se persigue en la tesis, se ha considerado más conveniente desarrollar un equipo basado en un método transitorio.

El equipo de medida desarrollado se basa en el método THW que, a su vez, se fundamenta en el modelo matemático ILS. Se ha elegido este método por ser muy adecuado para medir la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos. Concretamente se utiliza la técnica del hilo paralelo, la cual destaca por la simplicidad en el diseño y el bajo coste de construcción. Igualmente, el método THW se considera que es rápido y preciso. Otra ventaja es que permite obtener la conductividad térmica a temperatura ambiente ([dos Santos, 2005b](#)).

A continuación, se exponen las bases matemáticas en las que se basa el método de medida de la conductividad térmica elegido.

4.1.1 Fundamento matemático. Modelo de la Fuente Lineal Infinita (ILS)

El modelo de la Fuente Lineal Infinita (ILS: Infinite Line Source) es un modelo matemático que expresa la dependencia espacio-temporal de la temperatura con la potencia térmica por unidad de longitud, aplicada por una línea recta infinita sobre un medio también infinito.

Se trata de un modelo analítico en el que las hipótesis de partida son las siguientes: fuente de calor lineal, infinitamente larga, de capacidad calorífica cero y con una conductividad térmica infinita, que disipa un flujo térmico radial, constante y uniforme en un medio infinito, homogéneo e isótropo que tiene temperatura inicial uniforme y propiedades termofísicas constantes.

La temperatura del medio a una distancia radial r y en un tiempo determinado t será:

$$T(r, t) = T_0 + \Delta T(r, t) \quad [9]$$

Donde T_0 es la temperatura inicial que tiene el medio e $\Delta T(r, t)$ es la variación de temperatura del medio. La distancia radial r es medida desde la fuente de calor lineal y el tiempo t es medido desde el inicio del calentamiento.

Para obtener la ecuación de gobierno se establece un balance de energía (primer principio de la termodinámica), considerando que sólo hay transferencia de energía por conducción de calor. Haciendo uso de la ley de Fourier y de la ecuación de estado calórica, suponiendo que no hay fuentes de calor ni sumideros, que la conductividad térmica es constante y que el régimen es transitorio se obtiene la siguiente ecuación diferencial parcial de segundo orden, conocida como ecuación de difusión de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad [10]$$

Donde α es la difusividad térmica del medio y $\nabla^2 T$ la divergencia del gradiente de la temperatura.

En nuestro caso la geometría del dominio es un cilindro de longitud infinita en cuyo eje está la fuente de calor lineal. Por tanto, el flujo térmico será radial y estaremos ante un problema unidimensional, donde la Ecuación [10] se podrá expresar en coordenadas cilíndricas mediante la siguiente ecuación ([Çengel y Ghajar, 2011](#)).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \alpha \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad [11]$$

Para resolver esta ecuación diferencial en derivadas parciales, de tipo parabólico, se necesitan dos condiciones de contorno y una condición inicial.

Con las condiciones de contorno se establece que la fuente de calor tiene capacidad calorífica nula (no tiene inercia térmica), que el flujo térmico es constante y que el medio es infinito. Con la condición inicial se establece que, en el momento de iniciarse el calentamiento, la fuente lineal y el medio están a la misma temperatura.

A continuación, pueden verse las dos condiciones de contorno (una tipo Dirichlet y otra tipo Neumann) y la condición inicial.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left\{ r \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = -\frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \quad \text{para } t > 0 \quad q(0, t) = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \quad [12]$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \{ \Delta T(r, t) \} = 0 \quad \text{para } t \geq 0 \quad T(\infty, t) = T_0 \quad [13]$$

$$\Delta T(r, t) = 0 \quad \text{para } t = 0 \quad T(r, 0) = T_0 \quad [14]$$

Donde q es la potencia térmica por unidad de longitud y λ es la conductividad térmica del medio.

[Carslaw y Jaeger \(1959\)](#) dieron la siguiente solución para la Ecuación [11] :

$$\Delta T(r, t) = -\frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot Ei(-x) \quad [15]$$

Donde Ei es la integral exponencial de primer orden, cuyo valor es adimensional.

$$Ei(x) = -\int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (x > 0) \quad [16]$$

Siendo x una variable adimensional cuyo valor es:

$$x = \frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} \quad [17]$$

Como el valor de x es siempre positivo, el argumento de la función integral exponencial es siempre negativo por lo que, para salvar la discontinuidad en cero, conviene tomar la función $E_1(x) = -Ei(-x)$, de este modo:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot E_1(x) \quad [18]$$

$E_1(x)$ es una integral impropia cuya solución exacta se puede obtener mediante la siguiente serie infinita ([Abramowitz y Stegun, 1972](#)).

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{(x)^n}{n \cdot n!} \quad (|\arg x| < \pi) \quad [19]$$

Donde γ es la constante de Euler, cuyo valor es aproximadamente 0,5772.

Así pues:

$$E_1(x) = -\gamma - \ln(x) + x - \frac{x^2}{4} + \frac{x^3}{18} - \frac{x^4}{96} + \dots \quad [20]$$

De acuerdo a [dos Santos \(2005b\)](#) y [Franco \(2007\)](#), para valores muy pequeños de x ($\ll 1$), es decir: valores de t largos, con valores de r pequeños y valores de α suficientemente grandes, la función $E_1(x)$ puede aproximarse con los dos primeros términos de la expresión [20]. Por tanto:

$$E_1(x) \cong -\gamma - \ln(x) \quad [21]$$

Con esta aproximación, para $x \leq 0,01$ se comete un error de truncamiento muy pequeño ($\leq 0,25\%$) y el tiempo de calentamiento necesario vendrá dado por la siguiente expresión:

$$x = \frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} \leq 0,01 \rightarrow t \geq \frac{25r^2}{\alpha} \quad [22]$$

Por otra parte, sustituyendo la expresión [21] en la expresión [18] se obtiene:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot [-\gamma - \ln(x)] \quad [23]$$

Y considerando el valor de x dado por la expresión [17] se tiene:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right) \right] \quad [24]$$

A su vez:

$$-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right) = -\gamma + \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2}\right) \quad [25]$$

Por tanto:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[-\gamma + \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r^2}\right) \right] \quad [26]$$

Y operando:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\ln(t) + \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha}{r^2 \cdot e^\gamma}\right) \right] \quad [27]$$

Finalmente:

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \ln(t) + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha}{r^2 \cdot e^\gamma}\right) \quad [28]$$

Según esto, el incremento de temperatura se puede expresar como:

$$\Delta T(r, t) = m \cdot \ln(t) + n \quad [29]$$

Donde:

$$m = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \quad [30]$$

$$n = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha}{r^2 \cdot e^\gamma}\right) \quad [31]$$

Como se observa, la expresión [29] representa una recta de pendiente m y ordenada en el origen n . Por lo tanto, si los distintos valores de temperatura T y tiempo t , para un r dado, se representan en escala semilogarítmica se obtiene una recta y su pendiente permite determinar el valor de la conductividad térmica, mediante la expresión [32], obtenida a partir de la expresión [30]:

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot m} \quad [32]$$

Entre las aplicaciones del modelo de la Fuente Lineal Infinita tenemos:

- La medida de la conductividad térmica de una muestra, mediante el método del Hilo Caliente Transitorio (THW).
- La medida de la conductividad térmica de una muestra, mediante el método de la Aguja Térmica (TNP).
- La medida de la conductividad térmica de un sondeo geotérmico, mediante el ensayo TRT.

4.1.2 Planteamiento del problema

Se pretende desarrollar un equipo capaz de medir la conductividad térmica mediante la técnica de hilo paralelo del método THW. Este equipo de medida es una aplicación directa del modelo matemático ILS.

De acuerdo a la expresión [32], la conductividad térmica λ del medio se puede determinar sabiendo la potencia térmica q por unidad de longitud que disipa la fuente de calor lineal y conociendo la pendiente m de la recta, obtenida al representar en escala semilogarítmica los distintos valores de temperatura T y tiempo t , medidos desde el inicio del calentamiento y a una distancia radial r de la fuente de calor lineal.

4.1.3 Fórmula de aplicación

El valor de la potencia térmica q por unidad de longitud se puede determinar al conocer la intensidad eléctrica I de la fuente de calor lineal, su longitud L y la diferencia de potencial ΔV a lo largo de la misma.

$$q = \frac{\Delta V \cdot I}{L} \quad [33]$$

Sustituyendo la expresión [33] en la expresión [32] se obtiene la siguiente expresión, que será la fórmula utilizada para realizar el cálculo de la conductividad térmica con el equipo MCT.

$$\lambda = \frac{\Delta V \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot m} \quad [34]$$

4.1.4 Implementación de la solución

Para poder calcular la conductividad térmica mediante la expresión [34] hemos de obtener un conjunto de valores durante el ensayo.

De este conjunto de valores, unos son medidos manualmente (ΔV y L) y otros son obtenidos automáticamente (T y t). Por su parte, el valor de intensidad eléctrica (I) se selecciona en función de la conductividad térmica de la muestra, de acuerdo a la tabla obtenida durante la validación del equipo (Tabla 41).

Por lo tanto, necesitamos que el equipo de medida disponga de un sistema de calentamiento formado por un hilo de calentamiento y una fuente de alimentación, un sistema de registro que consta de un registrador de datos y un sistema de medición formado por un sensor de temperatura, un polímetro y un flexómetro.

En la fuente de alimentación, se selecciona y aplica la intensidad eléctrica (I) que va a circular por el hilo de calentamiento, en el cual se convierte la energía eléctrica en calor mediante el efecto Joule, estableciéndose así un flujo térmico hacia la muestra, incrementando de este modo su temperatura, a partir de la temperatura inicial de equilibrio.

Con la ayuda del polímetro y el flexómetro se mide, respectivamente, la diferencia de potencial en el hilo de calentamiento (ΔV) y la longitud del mismo (L).

A su vez, con el sensor de temperatura se miden los valores de temperatura a lo largo del ensayo y en el registrador de datos se almacenan estos valores de temperatura (T) y tiempo (t). Luego, estos datos se descargan y procesan en un ordenador personal o dispositivo análogo, calculándose así la pendiente m de la recta que, junto al resto de valores obtenidos durante el ensayo, permite determinar la conductividad térmica de la muestra (λ).

Por tanto, respetando las hipótesis, condiciones y aproximación del modelo matemático, se consiguen un conjunto de valores que permiten la determinación de la conductividad térmica de la muestra.

4.1.5 Aspecto constructivo del equipo MCT. Parámetros de diseño

Tanto en el diseño y construcción del equipo MCT como en la ejecución de los ensayos, se han respetado las hipótesis y condiciones (de contorno e inicial) establecidas en el modelo de la Fuente Lineal Infinita, así como las condiciones impuestas por la aproximación de la función integral exponencial de dicho modelo teórico.

Así pues, se ha construido un equipo que responde a ese modelo matemático, y por tanto tiene una fuente de calor lineal que disipa un flujo térmico radial, uniforme y constante.

Además, las muestras ensayadas deben ser homogéneas, isótropas y tener un tamaño que se pueda considerar infinito.

Por otra parte, al utilizar la aproximación vista en la expresión [21] se necesita que la distancia entre la fuente de calor lineal y el sensor de temperatura sea suficientemente pequeña y que el ensayo dure un tiempo suficientemente grande.

El equipo desarrollado utiliza un hilo de calentamiento como fuente de calor lineal, disipando así un flujo térmico radial, uniforme y constante hacia la muestra a ensayar (Figura 7).

Este hilo de calentamiento es un hilo metálico recto, de pequeño diámetro y conectado a una fuente de alimentación de corriente continua y regulable.

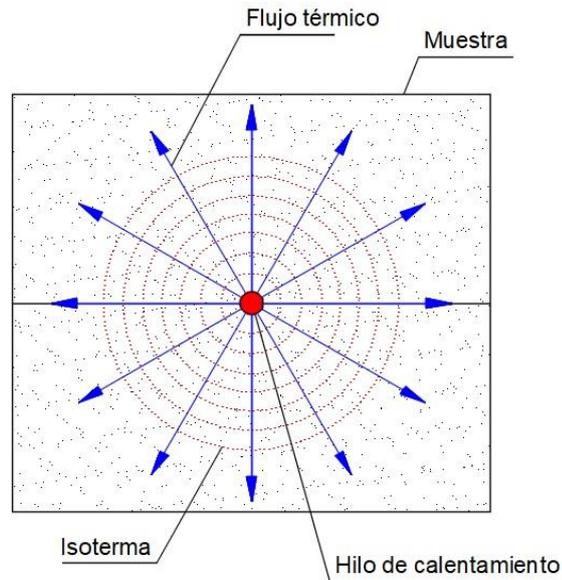


Figura 7. Propagación del flujo térmico en la muestra.

Para obtener el valor de m es necesario poder medir y almacenar los valores de temperatura T y tiempo t . Para ello se ha colocado, a una distancia radial r del hilo de calentamiento, un sensor de temperatura conectado a un registrador de datos.

Las muestras utilizadas en el equipo MCT están formadas por dos probetas iguales y, por tanto, del mismo material y las mismas dimensiones.

En la Figura 8 se puede ver un esquema del equipo MCT y la disposición de las dos probetas de la muestra durante la realización de un ensayo.

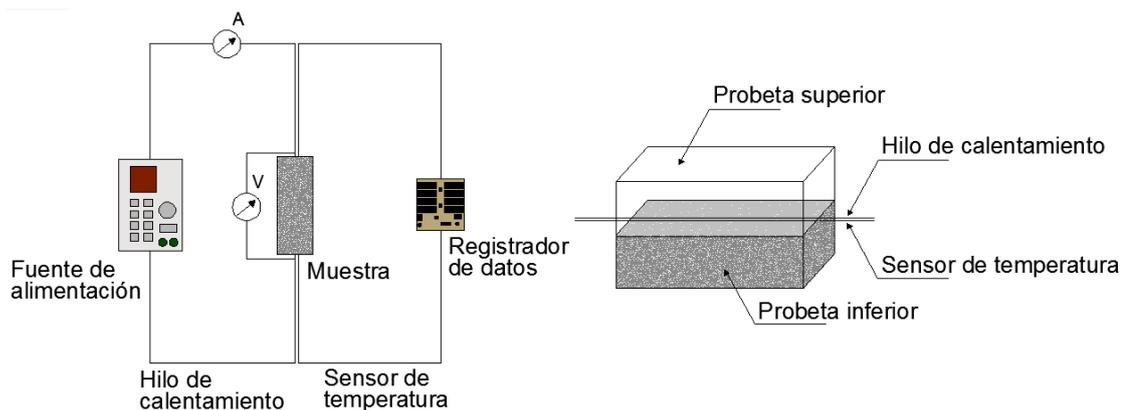


Figura 8. Esquema en planta del equipo MCT y disposición de la muestra.

Las partes de que consta el equipo MCT son las siguientes:

- Unidad de medición. Compuesta por el elemento de medición (formado por el hilo de calentamiento y el sensor de temperatura) y el elemento de soporte. La unidad de medición también consta del molde necesario para ensayar materiales disgregados.
- Fuente de alimentación. Mediante la cual se proporciona corriente continua y una potencia térmica constante al hilo de calentamiento.
- Registrador de datos. Es una PCB (Placa de Circuito Impreso) con un display (pantalla de visualización). Los datos obtenidos en los ensayos se almacenan en una tarjeta de memoria, de tipo microSD.
- Material accesorio. Está formado por 1 polímetro, 1 flexómetro, 2 pinzas de cocodrilo, 1 peso de 5 kg y 2 sensores de temperatura auxiliares. También es necesario un ordenador personal, o dispositivo análogo, con el que procesar los datos y obtener el resultado de la conductividad térmica.

4.1.5.1 Unidad de medición

Los parámetros de diseño más importantes de la unidad de medición han sido:

- ✓ El material, diámetro y longitud del hilo de calentamiento.
- ✓ El tipo de sensor de temperatura y su disposición.

En el montaje experimental del equipo MCT se ha utilizado un hilo de calentamiento de nicromo (Cronix 80 E) de 0,2 mm de diámetro. En la Tabla 4 se muestran sus características, medidas a temperatura ambiente.

Tabla 4. Características del hilo de calentamiento (Fuente: [VDM Metals](#)).

Composición química	80 % (níquel), 20 % (cromo)
Densidad	8.300 kg/m ³
Diámetro	0,2 mm
Calor específico	420 J/(kg·K)
Conductividad térmica	14,6 W/m·K
Resistividad	1,12 · 10 ⁻⁶ Ω.m
Coefficiente lineal de dilatación térmica	14,8 · 10 ⁻⁶ (°C) ⁻¹
Módulo de Young	200.000 MPa
Temperatura de fusión	1.400 °C

Se ha elegido nicromo debido a su alta resistividad eléctrica, combinada con su elevada resistencia a la oxidación, una aceptable conductividad térmica y un bajo coste.

Entre los diámetros comerciales disponibles se ha seleccionado 0,2 mm porque es un diámetro lo suficientemente pequeño para que se pueda considerar que la fuente de calor tiene un radio infinitesimal, asegurando además una alta resistencia eléctrica, pero sin sacrificar la resistencia mecánica.

El hilo de calentamiento del equipo tiene una longitud real de 510 mm. Para variar su longitud, ajustándolo a la longitud de la muestra, se conectan 2 pinzas de cocodrilo a la fuente de alimentación. De este modo, la longitud efectiva del hilo de calentamiento será la distancia entre las dos pinzas de cocodrilo, que a su vez coincidirá con la longitud de la muestra a ensayar.

En cualquier caso, para poder considerar que la fuente de calor es lineal se debe verificar la condición de que L/ϕ no sea menor de 100 (Franco, 2007; Daouas et al., 2008). Así pues, como el hilo de calentamiento tiene un diámetro ϕ igual a 0,2 mm, su longitud L debe ser mayor o igual a 20 mm.

Por otro lado, el sensor de temperatura elegido para el equipo MCT es un termopar tipo K (cromel-alumel) de 0,1 mm de diámetro, cuyas características pueden verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Características del termopar tipo K (Fuente: [OMEGA Engineering](#)).

Composición química	Cromel: 90 % Ni y 10 % Cr
	Alumel: 95 % Ni, 2 % Al, 2 % Mn y 1 % Si
Rango de temperatura	-200 °C a 1.250 °C
Exactitud	$\pm 1,1$ °C o bien $\pm 0,4$ % lectura (el mayor de los 2)
Tensión producida	-5,891 a 50,644 mV
Color identificativo del aislamiento	Verde (cromel)
	Blanco (alumel)
Diámetro de los alambres metálicos	0,1 mm
Polaridad	Positivo (cromel)
	Negativo (alumel)

Se ha seleccionado este tipo de sensor por sus pequeñas dimensiones (minimizando así la inercia térmica y la resistencia de contacto), por su aceptable estabilidad a largo plazo, por su rápido tiempo de respuesta y por su precisión y exactitud. Los termopares tipo K también destacan por su bajo coste y amplio rango de temperaturas (-200 a 1.250 °C).

El termopar del elemento de medición está colocado a una distancia radial $r = 1$ mm del hilo de calentamiento. Se ha elegido esta pequeña distancia para cumplir una de las condiciones necesarias para obtener valores muy pequeños de x ($\ll 1$), lo que permite utilizar la expresión aproximada de la integral exponencial y, por tanto, obtener el valor de la conductividad térmica de la muestra utilizando la expresión [34].

Como se ve en la Figura 9, el elemento de soporte del hilo de calentamiento y el termopar está formado por 2 barras cilíndricas de PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio), 2 tubos de PVC (Policloruro de Vinilo), 1 placa de PVC, 3 regletas de conexión y 3 elastómeros.

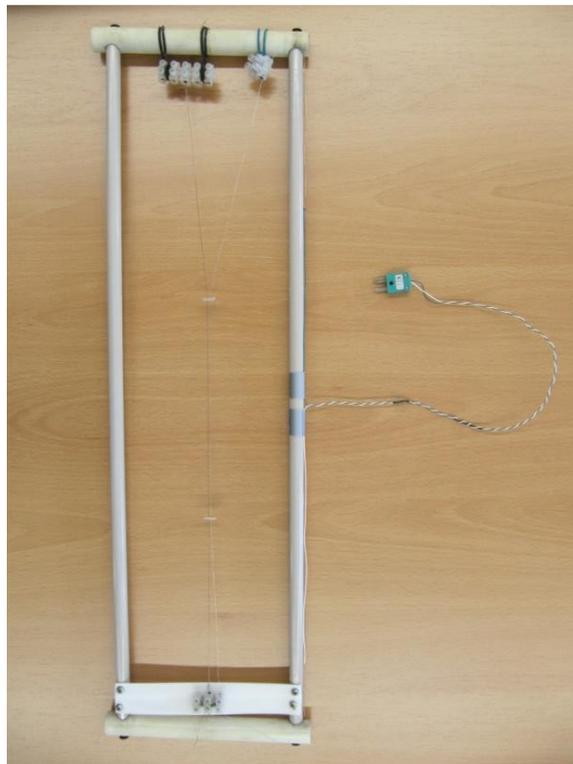


Figura 9. Vista general de la unidad de medición.

Las 2 barras cilíndricas de PRFV tienen unas dimensiones de 600 mm de longitud por 12 mm de diámetro y se disponen paralelas a una distancia de 140 mm, siendo ésta la anchura teórica máxima que pueden llevar a tener las muestras ensayados. Estas 2 barras se unen mediante 2 tubos de PVC de 180 mm de longitud y 20 mm de diámetro.

Tanto el hilo de calentamiento como el termopar se conectan por sus dos extremos a unas regletas de conexión. La distancia entre las dos regletas es de 510 mm, que teóricamente sería la longitud máxima que podrían llegar a tener las muestras.

En uno de los extremos del elemento de medición se utiliza 1 regleta de conexión que se fija sobre una placa rectangular de PVC con 160 mm de longitud, 30 mm de anchura y 2 mm de espesor, la cual está unida a las dos barras cilíndricas de PRFV.

Para el otro extremo del elemento de medición, debido a la dilatación térmica lineal que sufren durante el ensayo, se usan 2 regletas de conexión sujetas mediante unos elastómeros con el fin de mantener en todo momento la tensión adecuada, evitando así alabeos en el hilo de calentamiento. Estos posibles alabeos harían variar la separación de 1 mm entre el hilo de calentamiento y el termopar, e impedirían además que el hilo de calentamiento se pueda considerar recto, siendo esta una de las condiciones impuestas en el modelo teórico. A su vez, los elastómeros están unidos a uno de los tubos de PVC. El hecho de necesitar 2 regletas, y no 1, se debe a que el hilo de calentamiento y el termopar tienen distinta dilatación térmica.

Además, para mantener una separación constante de 1 mm entre el hilo de calentamiento y el termopar, se han utilizado dos pequeñas placas dieléctricas rígidas con un pequeño agujero central, a través del cual pasan el hilo de calentamiento y el termopar. Debido a la disposición que tienen el hilo de calentamiento y el termopar, estos tienden a situarse en dos puntos diametralmente opuestos del citado agujero, quedando con la separación de 1 mm en la zona comprendida entre las dos placas dieléctricas. La distancia entre estas dos placas se puede ajustar de manera que coincida con la longitud de la muestra a ensayar. Las dos placas deben ser dieléctricas para que la corriente del hilo de calentamiento no pase al termopar. Cada placa está compuesta de papel de mica embebido en resina de silicona, tiene unas dimensiones de 15 mm de largo, 10 mm de ancho y 0,6 mm de espesor y sus características se indican en la Tabla 6 .

Tabla 6. Características de la placa dieléctrica rígida (Fuente: [PH Pailamilla e Hijos](#)).

Tipo de placa	Rígida
Tipo de mica	Moscovita
Contenido de resina de silicona	< 10 %
Densidad	1.900 kg/m ³
Espesor	0,6 mm
Conductividad térmica	0,3 W/m·K
Resistividad	1,0 ·10 ¹² Ω.m
Temperatura máxima de trabajo	800 °C

Por otra parte, en la fabricación del elemento de soporte se han utilizado materiales ligeros, resistentes y de bajo coste. Además, para facilitar el montaje de la unidad de medición y la sustitución de cualquiera de sus componentes se ha decidido que todas las uniones sean desmontables.

Cabe mencionar que el equipo desarrollado permite la medida de la conductividad térmica de materiales disgregados, normalmente pulverulentos, ya que dispone de un recipiente o molde (Figura 10) compuesto por dos piezas, una inferior y otra superior, ambas de madera con un recubrimiento de 50 mm de poliestireno extruido (XPS), sobre el que se colocó una lámina decorativa para mejorar el aspecto estético.

Estas dos piezas se diseñaron una vez que se comprobó, en la etapa de puesta en marcha del equipo, que se necesitaba un tamaño mínimo de las muestras de 180 mm x 70 mm x 50 mm. Finalmente, se construyeron con unas dimensiones de 200 mm x 90 mm x 50 mm, por lo que la muestra de material disgregado tendrá 1.800 cm³. Por otra parte, la pieza inferior del molde también se puede utilizar con materiales conformados, conteniendo la probeta inferior de la muestra.



Figura 10. Vista de la pieza inferior del molde.

El XPS del molde cumple un doble propósito, pues además de servir para contener el material de las muestras disgregadas proporciona aislamiento térmico. Se ha empleado XPS, ya que, además de un buen aislante térmico, es un material barato, ligero, imputrescible y de fácil conformado.

El XPS utilizado es una plancha rígida, cuyas características se indican en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de la plancha de XPS (Fuente: [BASF](#)).

Marca comercial	Styrodur 2500 CN
Espesor	50 mm
Color	Verde
Conductividad térmica	0,033 W/m·K
Resistencia a compresión con una deformación del 10 %	200 KPa
Absorción de agua a largo plazo por inmersión	0,2 % volumen
Absorción de agua a largo plazo por difusión	2 – 4 % volumen
Reacción al fuego	Euroclase E
Temperatura máxima de trabajo	75 °C

Un aspecto considerado en el diseño del molde de medida es que se pueda cambiar de muestra con facilidad y además sea fácil de limpiar. Por otra parte, el elemento de soporte de la unidad de medición encaja en la pieza inferior del molde, facilitando de este modo la realización de los ensayos.

4.1.5.2 Fuente de alimentación

Es necesario que proporcione una corriente continua. Además, la fuente debe de ser regulable para poder realizar los ensayos de conductividad térmica a diferentes potencias térmicas (variando la intensidad eléctrica). También es necesario que la potencia térmica sea constante a lo largo del ensayo.

El hilo de calentamiento del quipo MCT se alimenta a través de dos pinzas de cocodrilo conectadas a la fuente de alimentación TENMA 72-10480 (Figura 11).

El voltaje se puede regular de 0 a 30 voltios y el amperaje de 0 a 3 amperios. Por lo tanto, puede suministrar una potencia máxima de 90 vatios, suficiente para realizar los ensayos de conductividad térmica.

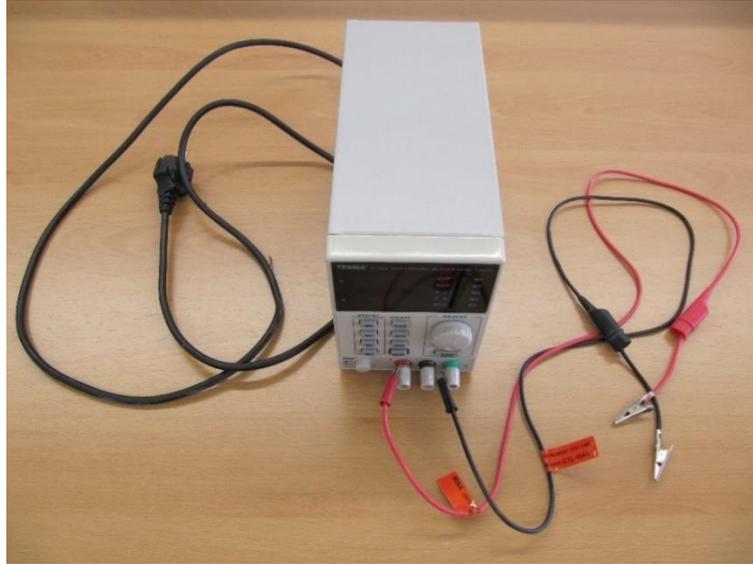


Figura 11. Fuente de alimentación TENMA 72-10480 y dos pinzas de cocodrilo.

Esta fuente de alimentación se conecta a una base de enchufe de 230 V y 50 Hz. Mediante la botonera se selecciona en el display (pantalla de visualización) la intensidad eléctrica de salida. En la Tabla 8 pueden verse sus principales características.

Tabla 8. Características de la fuente regulable TENMA 72-10480 (Fuente: [Farnell](#)).

Corriente de salida	Continua
Tensión de salida	0 a 30 V
Intensidad eléctrica de salida	0 a 3 A
Resolución (tensión)	10 mV
Resolución (intensidad)	1 mA
Precisión (tensión)	20 mV
Precisión (intensidad)	5 mA
Altura	156 mm
Anchura	110 mm
Profundidad	260 mm
Peso	3,5 kg
Temperatura ambiente	0-40 °C
Humedad relativa	< 80 %

4.1.5.3 Registrador de datos

Inicialmente, el registro de los datos se llevó a cabo utilizando una placa perforada sin patrón (perfboard). Este registrador requiere que, mientras dura el ensayo, la placa esté conectada a un PC a través de la tarjeta microcontroladora Arduino UNO.

Antes de soldar las conexiones de la perfboard se realizó el montaje sobre una placa de inserción (breadboard), verificándose el correcto funcionamiento del circuito (Figura 12).

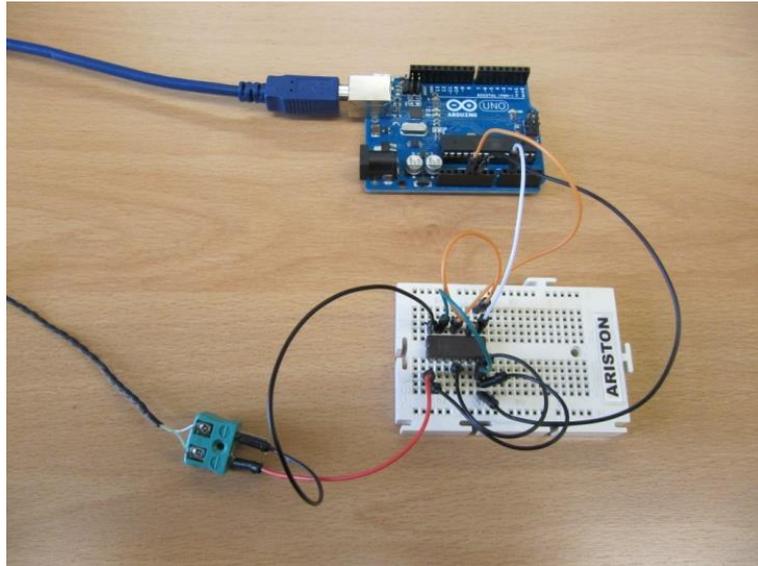


Figura 12. Registro de datos mediante breadboard conectada a la tarjeta Arduino UNO.

Para hacer este registrador de datos inicial se ha empleado una perfboard de 30 mm de largo por 18 mm de ancho y se han necesitado:

- 3 cables, el naranja para la alimentación a 5 V, el azul para la masa (GND) y el blanco-verde para la entrada analógica A1.
- 1 termopar tipo K.
- 1 conector de termopar tipo K.
- 1 amplificador AD595AQ.
- 1 zócalo para el amplificador AD595AQ.

El amplificador AD595AQ es un integrado de la multinacional Analog Devices con encapsulado de inserción de 14 pines, en concreto es el DIP14. Se trata de un amplificador para la señal de

los termopares tipo K que produce una salida de 10 mV/°C y alimentado con 5 V mide en el rango 0-500 °C, suficiente para las medidas realizadas en esta tesis.

En la Figura 13 puede verse la perfbboard conectada a la tarjeta Arduino UNO.

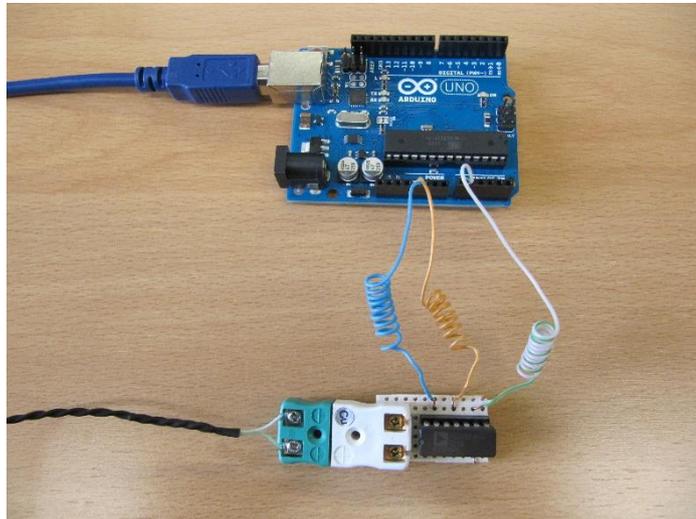


Figura 13. Registro de datos mediante perfbboard conectada a la tarjeta Arduino UNO.

Se realizaron varios ensayos usando la perfbboard en el equipo de medida (Figura 14) y una muestra-patrón de conductividad térmica conocida, obteniéndose unos valores similares a los declarados por el fabricante.

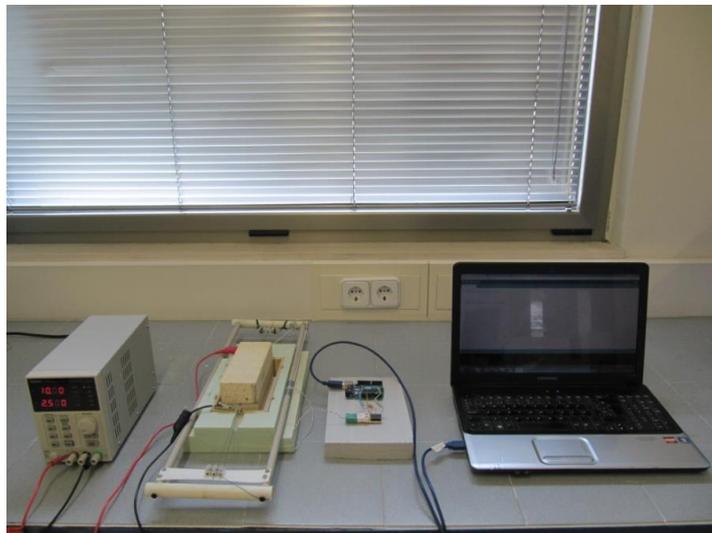


Figura 14. Ensayo de conductividad térmica utilizando el registrador de datos inicial.

A la vista de los resultados satisfactorios, en el equipo de investigación [Q-Thermie](#) se decide diseñar y construir una PCB, y por tanto un registrador de datos más compacto, autónomo y completamente configurable, pudiendo el usuario modificar los tiempos de muestreo o utilizar hasta 8 sensores de temperatura simultáneamente. Se ha utilizado una placa de fibra de vidrio de doble cara.

Este registrador de datos definitivo está formado por una PCB y un display LCD alfanumérico retroiluminado de 16x2 (16 caracteres y 2 líneas). El almacenamiento de los datos se realiza en una tarjeta de memoria microSD. El sistema de control de la PCB lo forman el microcontrolador ATmega328P de la empresa Atmel y un RTC (Real Time Clock) DS1337 de Maxim Integrated.

El microcontrolador ATmega328P combina una memoria Flash, donde almacena el código del programa, una memoria SRAM, donde almacena las variables del programa y una memoria EEPROM para almacenar los datos no volátiles. ATmega328P es un microcontrolador de la serie AVR, basado en la arquitectura Harvard modificada de 8 bits con tecnología RISC (Reduced Instruction Set Computer), es decir, con memorias separadas para programa y datos y un conjunto de instrucciones simples para realizar la programación.

La amplificación de la señal de los termopares se realiza con ocho amplificadores AD595AQ, uno para cada termopar. Para la conversión de la señal se utilizan dos conversores ADS1115 de Texas Instruments, se trata de convertidores A/D de 16 bit y 4 canales.

La PCB usa el protocolo I²C para comunicar el microcontrolador con el convertidor A/D y con el RTC. La PCB alimenta todos los componentes a 5 V, excepto la tarjeta microSD que lo hace a 3,3 V.

En la Figura 15 se ve una imagen de la PCB con los principales componentes, cuyos nombres se indican a continuación:

1. Pulsador de reset.
2. Conector del display LCD.
3. Microcontrolador ATmega328P.
4. Potenciómetro para el contraste del display LCD.
5. Amplificador AD595AQ.
6. Conector de alimentación.
7. Conector de termopar.
8. Conversor A/D ADS1115.

- 9. Tarjetero microSD.
- 10. Conector de la tarjeta Arduino UNO.
- 11. RTC DS1337.

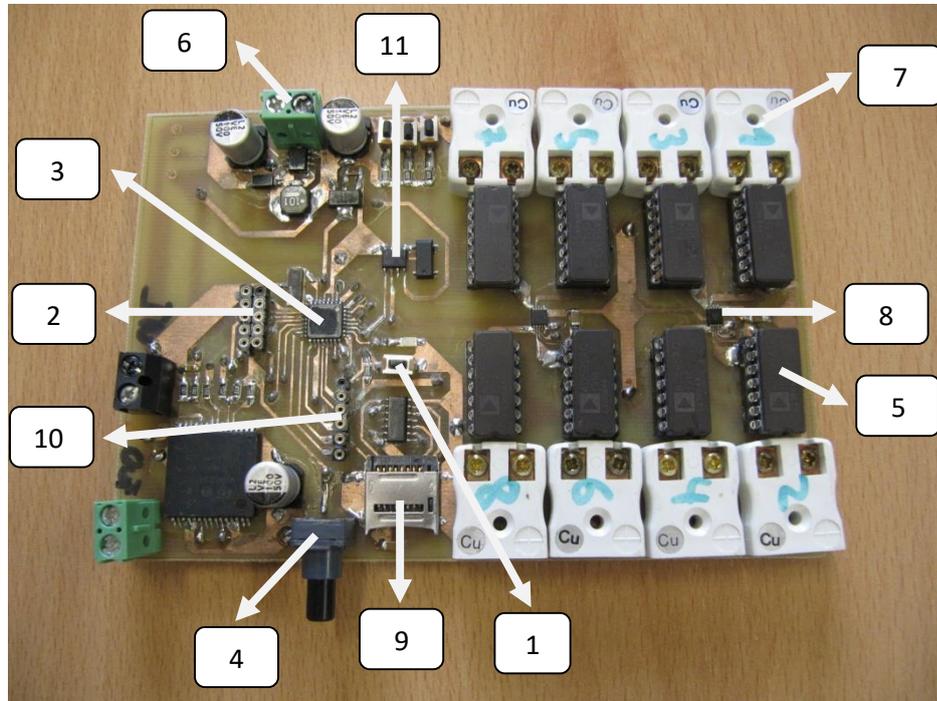


Figura 15. Vista de la PCB. Componentes principales.

Por el reverso de la PCB hay 2 resistencias pull-up, una pila de botón de litio de 3 V y un diodo.

Este registrador de datos se alimenta utilizando una fuente de alimentación que, conectada a una base de enchufe de 230 V y 50 Hz, produce una corriente continua de salida de 12 V.

La PCB se ha diseñado con el software Altium Designer (ANEXO I), versión 6. El esquemático puede verse en el ANEXO II. Por otra parte, la tarjeta Arduino UNO (ANEXO III), versión R3, se ha utilizado como programador. El microcontrolador ATmega328P de la PCB se ha programado utilizando el entorno de programación Arduino. El código fuente puede verse en el ANEXO IV.

4.1.5.4 Material accesorio

El material accesorio del equipo MCT está formado por un polímetro, 1 flexómetro, 2 pinzas de cocodrilo, 1 peso de 5 kg, 2 sensores de temperatura auxiliares y 1 ordenador personal o dispositivo análogo.

Estos 2 sensores auxiliares son iguales al sensor de temperatura del elemento de medición, por lo que se trata de 2 termopares tipo K, uno de ellos registrando la temperatura ambiente de la sala y el otro colocado sobre la cara exterior de la muestra, para así determinar cuando el flujo térmico alcanza la superficie exterior de la muestra y, por tanto, comienzan los efectos de borde.

Para realizar las medidas de voltaje en el hilo de calentamiento se ha usado un polímetro digital de la marca comercial UNI-T, cuyas principales características se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Características del polímetro UNIT-T (Fuente: [Manual de usuario](#)).

Modelo	UT30B
Voltaje CC (rango)	200 mV / 2.000 mV / 20 V / 200 V / 500 V \pm (0,5 %)
Voltaje CA (rango)	200 V / 500 V \pm (1,2 % + 10 dígitos)
Intensidad CC (rango)	200 μ A / 2.000 μ A / 20 mA / 200 mA / 10 A \pm (1 %)
Voltaje CC (resolución)	10 mV (en el rango de 20 V)
Intensidad CC (resolución)	10 mA (en el rango de 10 A)
Alimentación	Batería de 9 V
Display	LCD de 48 x 16 mm
Dimensiones	130 x 74 x 41 mm
Peso	160 g
Condiciones ambientales	(0-40) °C y < 80 % H.R.

4.1.6 Conexión eléctrica del equipo MCT

Una vez que se ha realizado el diseño, fabricación y montaje del equipo MCT se realizan las siguientes conexiones eléctricas:

- ✓ Conectar el hilo de calentamiento del equipo a la fuente de alimentación regulable. Un extremo de dicho hilo se conecta al positivo de la fuente y el otro extremo al negativo, sin importar el orden.
- ✓ Conectar el display LCD a la PCB. El pin 1 se conecta al pin 1, siendo ambos de color negro para facilitar su identificación.
- ✓ Conectar el termopar del elemento de medición al conector 1 de la PCB, a través de un conector miniatura macho de clavijas planas.
- ✓ Conectar los 2 termopares auxiliares a los conectores 2 y 4 de la PCB, utilizando conectores miniatura macho de clavijas planas.

- ✓ Conectar la alimentación de la PCB. Esta tiene que ser de 8 a 40 V en corriente continua. Se utilizará una fuente de alimentación conmutada y salida en corriente continua a 12 V. Con ayuda de un destornillador, los dos cables negros de la fuente se conectan a la PCB respetando la polaridad, es decir, el cable positivo se une al conector positivo de la PCB y el negativo al negativo de la PCB. Para facilitar la identificación, el conector de la PCB tiene escrito el signo + y el signo -.

4.1.7 Características de las muestras utilizadas en el equipo MCT

Debido a la naturaleza de las muestras utilizadas en los ensayos se puede considerar que son homogéneas e isotrópicas, y que, como el incremento de temperatura producido durante el ensayo es pequeño, sus propiedades termofísicas no varían con la temperatura, por lo que se considera que tanto su conductividad térmica como su difusividad térmica son constantes.

Además, se va a considerar que el tamaño de las muestras ensayadas es infinito, para lo cual estas deben de tener, en función de la conductividad térmica, unas dimensiones mínimas, cuyo valor se obtiene durante la validación del equipo (Tabla 41).

Cada una de las muestras utilizadas en la presente tesis está formada por 2 probetas, en forma de paralelepípedo rectangular, del mismo material y las mismas dimensiones. El hilo de calentamiento y el sensor de temperatura del elemento de medición van intercalados longitudinalmente entre las dos probetas que constituyen la muestra. Además, con el objeto de minimizar la resistencia de contacto entre las dos probetas de cada muestra, se coloca un peso de 5 kg sobre la probeta superior de cada muestra. Además, antes de realizar los ensayos, en cada muestra se comprueba visualmente el grado de planicidad y paralelismo de las dos caras que van a estar en contacto durante la medición.

Durante los ensayos se han mantenido las condiciones necesarias para que las medidas no se perturbasen por la presencia de fuentes de calor ni sumideros. Del mismo modo, antes de realizar cada ensayo, se ha asegurado que las muestras tuviesen una temperatura uniforme y del mismo valor que la temperatura de la sala.

4.1.8 Aspecto operativo del equipo MCT. Cálculo de la conductividad térmica

Para el cálculo de la conductividad térmica con el equipo MCT se utiliza la expresión [34]. El tiempo de calentamiento necesario para poder aplicar dicha expresión, con un error de truncamiento menor o igual al 0,25 %, se obtiene mediante la expresión [22]. De este modo, de todas las muestras utilizadas en la tesis es la bentonita la que tiene un valor de difusividad térmica más bajo ($0,18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), siendo la que necesita mayor tiempo de calentamiento que, para $r = 1 \text{ mm}$, deberá ser mayor o igual a 139 segundos.

A pesar de ello, en todos los ensayos se ha establecido un tiempo de calentamiento muy superior para disponer, cuando la potencia térmica aplicada y las dimensiones de la muestra son las determinadas durante la validación (Tabla 41), de un número adecuado de datos con los que calcular la pendiente m de la recta. En general, durante la validación del equipo MCT los ensayos se han llevado a cabo con tiempos de calentamiento de aproximadamente 1 hora, comprobándose finalmente que en todas muestras ensayadas es suficiente con un máximo de 15 minutos.

4.1.8.1 Cálculo de la pendiente de la recta de regresión

La pendiente m de la recta se obtiene de la curva de calentamiento del termopar del elemento de medición en escala semilogarítmica. Esta gráfica se obtiene al dibujar en el eje de ordenadas los valores del incremento de temperatura del termopar del elemento de medición y en el eje de abscisas el logaritmo neperiano del tiempo transcurrido desde el inicio del calentamiento. Teóricamente, esta curva de calentamiento debería ser una línea recta. Sin embargo, como las hipótesis del modelo matemático de la Fuente Lineal Infinita (ILS) son ideales, en la práctica la curva real obtenida tiene tres tramos (Figura 16), de los que solamente el tramo intermedio (Tramo 2) es recto y, por tanto, solo ahí el modelo matemático ILS es aplicable.

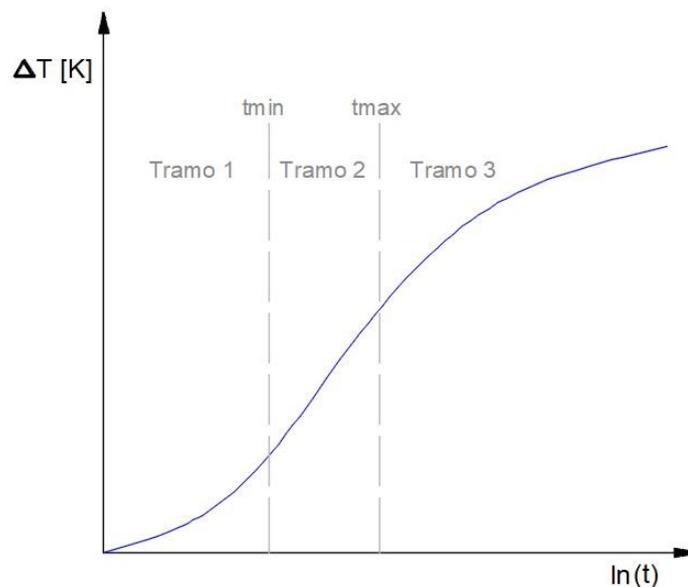


Figura 16. Curva de calentamiento del termopar del elemento de medición.

El Tramo 1 es debido, principalmente, a la resistencia de contacto, a la inercia térmica como consecuencia de la capacidad calorífica que tiene el hilo de calentamiento y a la existencia de transferencia de calor por convección y radiación. Por su parte, el Tramo 3 se debe, principalmente, a los efectos de borde como consecuencia de las dimensiones finitas de la muestra. Nuestro objetivo es determinar el intervalo de tiempo (t_{min} , t_{max}) correspondiente

al tramo recto y para ello debemos observar la curva de calentamiento real junto con la evolución, respecto a la temperatura de la sala, de la temperatura del termopar colocado sobre la probeta superior de cada una de las muestras. De este modo, se establece la zona recta (Tramo 2) de la que se calcula su pendiente m .

La pendiente m se puede obtener gráficamente, aunque es más preciso obtenerla de forma analítica mediante un ajuste mínimo-cuadrático.

4.1.8.2 Realización del ensayo de conductividad térmica con el equipo MCT

Los pasos que hay que llevar a cabo en el equipo MCT para la realización de un ensayo son:

1. Colocar la probeta inferior de la muestra en el molde del equipo. A continuación, se coloca el elemento de medición sobre esa probeta, de manera que el hilo de calentamiento se disponga dividiéndola longitudinalmente en dos partes iguales y de forma que la soldadura caliente del termopar quede aproximadamente en el centroide de la probeta. Seguidamente se coloca la probeta superior de la muestra. En caso de ensayar materiales disgregados se procede de manera análoga, pero usando los dos moldes de la unidad de medición.
1. Posicionar las pinzas de cocodrilo sobre el hilo de calentamiento y lo más próximo posible a la muestra.
2. Colocar el peso de 5 kg sobre la probeta superior de la muestra.
3. Colocar los sensores auxiliares en su posición, para así registrar la temperatura de la sala y la temperatura de la cara superior de la muestra.
4. Introducir la tarjeta microSD en el porta tarjetas de la PCB.
5. Encender la fuente de alimentación TENMA 72-10480 pulsando el botón POWER y seleccionar la intensidad eléctrica pulsando el botón Voltage/Current del panel frontal, haciendo uso de las flechas y la rueda.
6. Iniciar simultáneamente el calentamiento y el registro de datos. Para ello se conecta la fuente de alimentación del registrador de datos a una base de enchufe de 230 V y 50 Hz, a la vez que se pulsa el botón Off/On de la fuente de alimentación regulable TENMA 72-10480. A partir de este momento la tarjeta microSD comienza a registrar las temperaturas y tiempos.
7. Después de iniciado el registro de datos, se mide la diferencia de potencial en el hilo de calentamiento y la distancia entre las dos pinzas de cocodrilo, utilizando para ello

un polímetro y un flexómetro, respectivamente. Se anotan estos dos valores y el amperaje seleccionado previamente en la fuente de alimentación TENMA 72-10480.

8. Medir nuevamente la diferencia de potencial. Durante la realización del ensayo, el aumento de temperatura en el hilo de calentamiento provoca un aumento en su resistencia eléctrica y, en consecuencia, una disminución del voltaje medido. Por ello, en cada ensayo se mide dos veces la diferencia de potencial, una al comienzo y otra al final, utilizándose el valor medio en los cálculos de la potencia eléctrica.
9. Finalizar el ensayo, pulsando el botón Off/On de la fuente TENMA 72-10480.
10. Por último, se extrae la tarjeta microSD de la PCB.

El tiempo necesario para que, una vez terminado un ensayo, la temperatura de la muestra se equilibre con la temperatura ambiente y la del hilo de calentamiento y así poder repetir el ensayo sobre esa misma muestra, sin necesidad de desmontar el dispositivo, depende de las dimensiones y conductividad térmica de la muestra, de la temperatura de la sala, de la duración del ensayo y de la intensidad eléctrica usada durante el ensayo, pero durante la validación del equipo de medida se ha comprobado experimentalmente que 2 horas es un tiempo suficiente.

4.1.8.3 Determinación de la conductividad térmica con el equipo MCT

Los pasos a realizar para llevar a cabo el volcado de los datos y el posterior cálculo de la conductividad térmica son los siguientes:

1. Introducir la tarjeta microSD en el lector de tarjetas del ordenador, utilizando en caso necesario un adaptador.
2. Importar el archivo DATALOG.CSV en el programa Excel. A partir de los datos importados (temperaturas y tiempos de los 3 termopares se obtiene la curva de calentamiento en escala semilogarítmica y la recta de regresión.
3. Aplicar la recta de calibración al termopar del elemento de medición (Figura 21).
4. Con los valores de intensidad eléctrica, diferencia de potencial y longitud del hilo de calentamiento (distancia entre las 2 pinzas de cocodrilo), medidos durante el ensayo, junto con el valor de la pendiente del tramo recto de la recta de regresión, calculada con el programa Excel siguiendo el procedimiento visto en 4.1.8.1, se obtiene el valor de la conductividad térmica de la muestra utilizando la expresión [34].

Se asume que los valores de conductividad térmica obtenidos en los ensayos son constantes en el rango de temperaturas medido durante el ensayo.

En todos los ensayos se determina la conductividad térmica aparente de la muestra seca. Para ello, antes de realizar los ensayos se dejan las muestras dentro de una estufa a 60 °C durante 5 días y luego se dejan a temperatura ambiente durante 48 horas, para que la temperatura de las mismas y la de la sala se equilibren.

Se debe comprobar que, para llevar a cabo cada ensayo, la temperatura ambiente de la sala y de la muestra sean aproximadamente iguales, admitiéndose una discrepancia máxima de 1 °C (valor aproximadamente igual a la exactitud de los termopares utilizados en el equipo MCT).

Los ensayos de medida de la conductividad térmica se realizaron con las siguientes condiciones ambientales: 15-25 °C de temperatura y una humedad relativa del 55-65 %.

Previamente a la realización de las medidas, se hacen unas marcas en ambas probetas de cada muestra con el objeto de garantizar que en todos los ensayos estas estuviesen colocados en la misma posición.

4.1.9 Validación del equipo MCT

Para el proceso de validación se llevan a cabo una serie de actuaciones. En primer lugar, se realiza la calibración de los termopares usando un termómetro de mercurio.

Más tarde, mediante un polímetro se procede a la verificación de los valores de intensidad eléctrica mostrados por la fuente de alimentación.

Posteriormente, con el objeto de estudiar la influencia que la intensidad eléctrica y el tamaño de las muestras tienen sobre el valor de la conductividad térmica obtenida, se llevaron a cabo ensayos, a diferentes intensidades eléctricas, sobre 4 muestras comerciales de diferentes tamaños y conductividad térmica conocida. Estas 4 muestras-patrón son: Skamol SM-65, Macizo M5R, MAXIAL 310 y CN-90BA, fabricadas respectivamente por [Skamol A/S](#), [Cerámica La Espina S.L.](#), [RHI](#) y [Cerámica del Nalón S.A.](#)

Después de determinar cuál es el tamaño mínimo de las muestras y la intensidad eléctrica apropiada se realizan los ensayos necesarios para estudiar la influencia que, en la reducción de la resistencia de contacto y, en consecuencia, en el valor de la conductividad térmica obtenida, tiene la realización en la muestra de una ranura y el relleno de la misma. Estos ensayos se realizaron sobre la muestra-patrón Macizo M5R.

Por último, después de realizar la puesta en marcha del equipo MCT, y para completar la validación del mismo, se procede a determinar la conductividad térmica de 4 rellenos que tradicionalmente han sido usados en los sondeos geotérmicos, tales como bentonita, pasta de cemento, mortero de cemento con arena y mortero de cemento con bentonita. Para ello, se

ha utilizado el equipo comercial Shotherm QTM-F1 y el equipo MCT, pudiendo así comparar los resultados obtenidos en ambos equipos con los valores reportados en la literatura.

Antes de pasar a exponer las distintas actuaciones del proceso de validación se describen y detallan las muestras utilizadas durante dicho proceso. Estas son las muestras-patrón y las muestras de relleno geotérmico de uso común.

4.1.9.1 Muestras-patrón

En la Tabla 10 puede verse el nombre, composición, tamaño y conductividad térmica, a 25 °C, de las 4 muestras-patrón.

Tabla 10. Muestras-patrón utilizadas en la validación.

Nombre	Composición	Tamaño [mm]	λ [W/m·K]
Skamol SM-65	Diatomita	Pequeño: 110 x 50 x 35	0,13
Macizo M5R	Arcilla roja	Pequeño: 110 x 50 x 35	0,70
		Mediano: 180 x 70 x 50 Grande: 240 x 120 x 60	
MAXIAL 310	Chamota	Mediano: 180 x 70 x 50	1,20
CN-90BA	Alúmina	Pequeño: 110 x 50 x 35	2,80
		Mediano: 180 x 70 x 50 Grande: 240 x 120 x 60	

La muestra-patrón Skamol SM-65 está formada por dos ladrillos de diatomita con las siguientes características (Tabla 11):

Tabla 11. Características de Skamol SM-65 (Fuente: [Skamol A/S](#)).

Composición química	SiO ₂ : 77 %
	Al ₂ O ₃ : 9 %
	Fe ₂ O ₃ : 7 %
	K ₂ O: 1,6 %
	MgO: 1,3 %
	CaO : 0,8 %
	TiO ₂ : 0,7 %
Densidad aparente	650 kg/m ³
Porosidad	72 %
Temperatura máxima de trabajo	950 °C
Conductividad térmica a 25 °C	0,13 W/m·K

En la Tabla 12 pueden verse las características de la muestra-patrón Macizo rústico M5R, formada por formada por dos ladrillos de arcilla.

Tabla 12. Características de Macizo rústico M5R (Fuente: [Cerámica La Espina](#)).

Composición química	SiO ₂ : 67 %
	Al ₂ O ₃ : 9 %
	CaO: 8,4 %
	Fe ₂ O ₃ : 4,9 %
Densidad aparente	1.950 kg/m ³
Resistencia a compresión simple	15 N/mm ²
Conductividad térmica a 25 °C	0,70 W/m·K

La muestra-patrón MAXIAL 310, cuyas características se indican en la Tabla 13 está formada por dos ladrillos de chamota.

Tabla 13. Características de MAXIAL 310 (Fuente: [RHI](#)).

Composición química	SiO ₂ : 54 %
	Al ₂ O ₃ : 41 %
	TiO ₂ : 1,7 %
	Fe ₂ O ₃ : 1,5 %
Densidad aparente	2.230 kg/m ³
Porosidad	17 %
Dilatación térmica a 1000 °C	0,65 %
Resistencia a compresión simple	50 N/mm ²
Conductividad térmica a 25 °C	1,20 W/m·K

La muestra-patrón CN-90BA está formada por ladrillos de alto contenido en alúmina. Sus características se indican en la Tabla 14.

Tabla 14. Características de CN-90BA (Fuente: [Cerámica del Nalón](#)).

Composición química	Al ₂ O ₃ : > 90 %
Densidad aparente	2.450 kg/m ³
Porosidad	15 %
Resistencia a compresión simple	60 N/mm ²
Conductividad térmica a 25 °C	2,80 W/m·K

Sobre la muestra-patrón Macizo M5R de tamaño 180 mm x 70 mm x 50 mm se realizó una ranura. Quizás sería ideal realizar 2 ranuras paralelas sobre el ladrillo, de manera tal que el hilo de calentamiento quede alojado en una de ellas y el termopar del elemento de medición en la otra, pero debido a la dificultad de mecanizar estas con una separación de 1 mm se realiza únicamente una ranura. Se ha seleccionado la muestra-patrón Macizo M5R por ser en la que más fácilmente se mecaniza una ranura ya que se trata de la muestra-patrón menos dura y abrasiva.

4.1.9.2 Muestras de relleno geotérmico de uso común

Se han preparado 4 muestras de rellenos geotérmicos de uso común.

4.1.9.2.1 Materiales y nombre de las muestras

Los materiales utilizados para la elaboración de las muestras son: cemento Portland (c), árido (s), agua (w), adición (b) y aditivo (r).

El cemento Portland utilizado tiene la designación CEM II/B-V 32,5 R. Según la Instrucción para la recepción de cementos ([RC-16](#)), corresponde a un cemento común con un 21-35 % de cenizas volantes, con clase resistente 32,5 y alta resistencia inicial. Este cemento Portland gris procede de la empresa Cementos Tudela Veguín, del grupo [Masaveu](#).

El árido utilizado es arena silíceo (AS). Es un árido con partículas redondeadas y tamaño máximo de 2 mm, procedente de la empresa [Areneros de Olivares S.L.](#)

La adición empleada es bentonita sódica (BS), proporcionada por Sepiolsa, del grupo [Minersa](#).

En el amasado de todas las muestras se ha utilizado agua potable, procedente de la red pública de Oviedo.

El aditivo empleado es el superplastificante (sp) RHEOBUILD 1000, cuyas características se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Características del aditivo RHEOBUILD (Fuente: [BASF](#)).

Base química	Naftaleno
Dosificación recomendada	1-2 % (sobre el peso del conglomerante)
pH	7
Contenido en cloruros	< 0,1 %
Aspecto físico	Líquido marrón oscuro

Como el aumento del contenido de superplastificante mejora la bombeabilidad y previene la segregación, se ha elegido la más elevada dosificación recomendada por el fabricante, es decir, 2 % respecto al peso del conglomerante, que corresponde a una relación (r/c) de 0,02. Para la codificación de las 4 muestras se ha utilizado una nomenclatura compuesta por la letra M seguida de un número. Esta codificación se marca de forma permanente sobre las muestras, una vez han endurecido, con el objeto de poder identificarlas correctamente. En la Tabla 16 figura el nombre de las 4 muestras y los materiales utilizados en las mismas.

Tabla 16. Nombre y materiales de las muestras de relleno geotérmico de uso común.

Nombre	Materiales			
	Cemento c	Árido s	Adición b	Aditivo r
M 01	---	---	BS	---
M 02	CEM II	---	---	sp
M 03	CEM II	AS	---	sp
M 04	CEM II	---	BS	sp

La muestra M 01 es de bentonita, la muestra M 02 es de pasta de cemento, la muestra M 03 es de mortero de cemento con arena sílicea y la muestra M 04 es de mortero de cemento con bentonita.

4.1.9.2.2 Dosificación de las muestras

Las dosificaciones de los diversos componentes utilizados en las mezclas se indican a través de la relación árido/cemento (s/c), la relación adición/cemento (b/c), la relación agua/cemento (w/c), la relación aditivo/cemento (r/c) y la relación agua/adición (w/b).

La cantidad de agua de amasado de todas las muestras es la necesaria para conseguir mezclas con consistencia fluida.

En la Tabla 17 puede verse el nombre y la dosificación en peso de las 4 muestras.

Tabla 17. Nombre y dosificación en peso de las muestras de relleno geotérmico de uso común.

Nombre	Dosificación				
	s/c	b/c	w/b	w/c	r/c
M 01	---	---	4	---	---
M 02	---	---	---	0,25	0,02
M 03	2	---	---	0,45	0,02
M 04	---	0,20	---	0,52	0,02

4.1.9.2.3 Dimensiones de las muestras

La determinación de la conductividad térmica se lleva a cabo usando el equipo comercial Shotherm QTM-F1 y el equipo MCT. Como ambos equipos se basan en el método THW, las muestras se han hecho con forma de prisma, utilizando para ello unos moldes construidos ex profeso con los cuales se garantiza que una de las caras mayores de cada probeta sean planas y lisas, con el fin de reducir la resistencia de contacto durante la realización del ensayo de conductividad térmica.

Cada una de las muestras está formada por dos probetas con forma de paralelepípedo rectangular, del mismo material y las mismas dimensiones: 180 mm x 70 mm x 50 mm (determinadas durante la etapa de validación del equipo). Con esas medidas también se cumple el tamaño mínimo de muestra necesario para el equipo comercial (Tabla 65).

4.1.9.2.4 Fabricación de las muestras

En primer lugar, los componentes se pesan en una balanza de precisión, modelo Europe 3000 de la marca Gibertini (Figura 17), para obtener la dosificación establecida en cada muestra.

Más tarde, los distintos componentes se mezclan mediante una amasadora planetaria de la marca ICON con 5 litros de capacidad (Figura 18), consiguiendo así una mezcla homogénea y exenta de grumos. El amasado sigue el procedimiento establecido en la norma [UNE-EN 196-1](#), con alguna ligera modificación.



Figura 17. Balanza de precisión.



Figura 18. Amasadora planetaria.

El amasado de las mezclas M 02 y M 03 se realizó durante 3 minutos, pero las mezclas con bentonita han requerido un amasado más enérgico, especialmente la mezcla M 01.

A continuación, la mezcla ya amasada se vierte en un molde. En la Figura 19 puede verse uno de los molde de madera usado en la fabricación de las muestras.



Figura 19. Molde para cuatro probetas.

Los moldes se han fabricado en madera por ser un material barato y ligero. Sin embargo, tiene el inconveniente de absorber humedad de la mezcla. Para solventar este problema se ha decidido colocar una lámina de papel film, evitando de este modo el contacto directo con las paredes del molde. Además, como la consistencia de las muestras es fluida, se evita que parte de la mezcla se pueda perder a través de las juntas del molde.

Posteriormente, la muestra se introduce en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa. Las muestras que contienen cemento (M 02, M 03 y M 04) se desmoldaron a las 48 horas de su amasado, mientras que la muestra de bentonita (M 01) no pudo desmoldarse hasta pasados 15 días de su amasado. A continuación, las tres muestras que contienen cemento se introdujeron durante 7 días en un baño de agua para llevar a cabo su curado.

4.1.9.3 Calibración de los sensores de temperatura

Los termopares usados para el registro de datos se contrastaron utilizando un baño de agua (Figura 20). En un recipiente de vidrio se introdujo un termómetro de mercurio, que se utilizó como patrón de calibración, y los termopares tipo K. Progresivamente se añadió hielo triturado con un tamaño de los gránulos inferior a 1 cm.

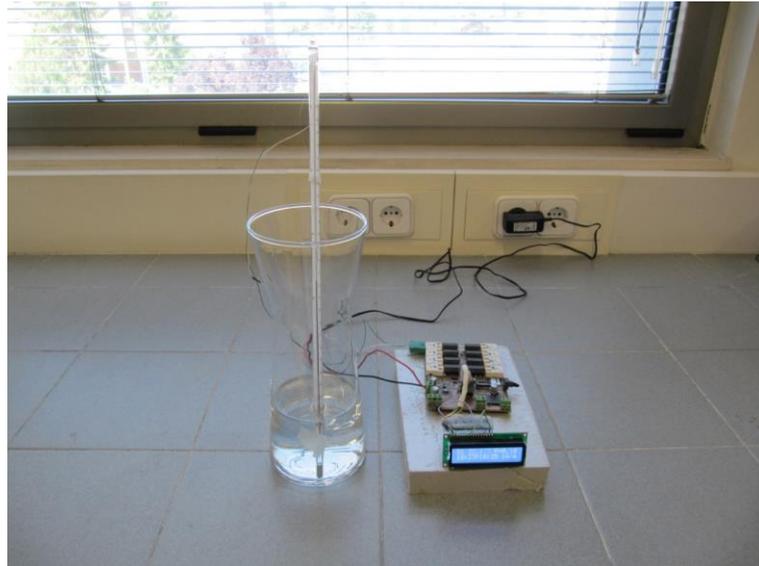


Figura 20. Calibración del termopar del elemento de medición.

Durante 30 minutos se registraron los descensos de temperatura de los termopares y el termómetro de mercurio, alcanzándose una temperatura final próxima a los 20 °C. Una vez finalizado el ensayo se obtiene la recta de calibración termopar del elemento de medición (Figura 21).

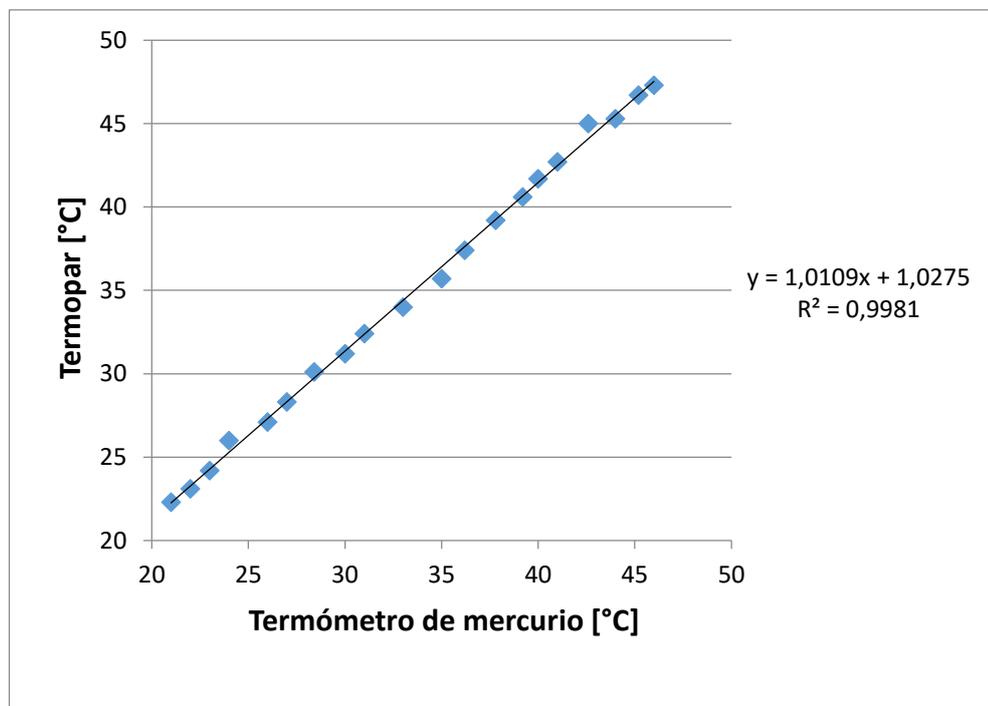


Figura 21. Recta de calibración del termopar del elemento de medición.

4.1.9.4 Comprobación de la fuente de alimentación de la unidad de medición

Colocando un polímetro en serie con el hilo de calentamiento, se midieron unos valores de intensidad eléctrica prácticamente iguales a los indicados en el display de la fuente de alimentación regulable.

4.1.9.5 Tamaño mínimo de la muestra e intensidad eléctrica apropiada

En las 4 muestras-patrón se han realizado los ensayos de conductividad térmica, utilizando 4 intensidades eléctricas:

- ✓ 0,5 A.
- ✓ 1 A.
- ✓ 1,5 A.
- ✓ 2 A.

Con el hilo de calentamiento utilizado en el equipo MCT, estas 4 intensidades eléctricas se corresponden a unas potencias por unidad de longitud de 6 W/m (para 0,5 A), 25 W/m (para 1 A), 56 W/m (para 1,5 A) y 100 W/m (2 A).

Se ha considerado que la máxima intensidad eléctrica a aplicar en los ensayos sean 2 A, para así limitar la temperatura alcanzada en el hilo de calentamiento y en consecuencia minimizar la radiación térmica.

Como las muestras-patrón tienen distintos tamaños y los ensayos de conductividad térmica se realizan con diferentes intensidades eléctricas, es posible determinar el tamaño mínimo necesario en las muestras y la intensidad eléctrica apropiada. Para ello, se han realizado 32 ensayos de conductividad térmica.

En la Figura 22 puede verse un ensayo de conductividad térmica de la muestra-patrón MAXIAL 310 en el equipo MCT.

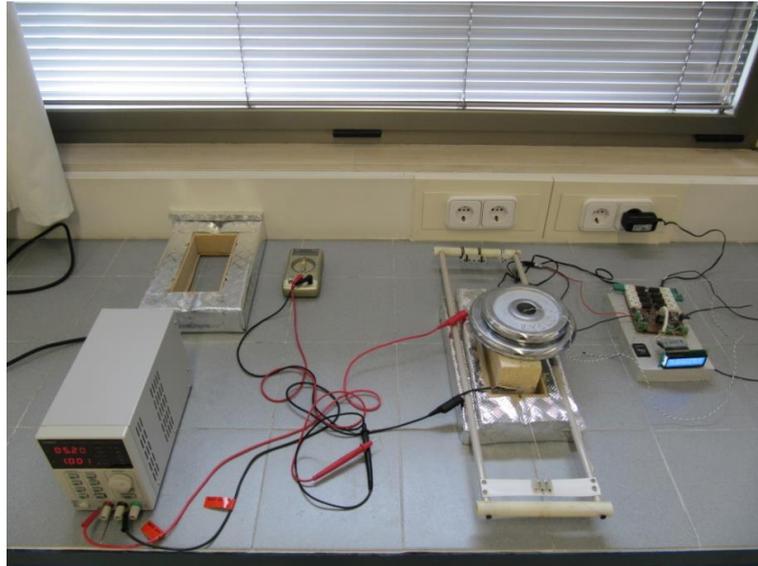


Figura 22. Ensayo de la muestra-patrón MAXIAL 310 en el equipo MCT.

4.1.9.6 Influencia producida por la ranura y el relleno de la misma

Se realizan un total de 6 ensayos de conductividad térmica sobre el tamaño mediano de la muestra-patrón Macizo M5R, utilizando las siguientes intensidades eléctricas:

- ✓ 1 A.
- ✓ 1,5 A.
- ✓ 2 A.

Estos valores de intensidad eléctrica y tamaño de muestra son los más apropiados para esta muestra-patrón, tal como se ha determinado en la validación del equipo MCT (Tabla 41).

En uno de los dos ladrillos de la muestra-patrón Macizo M5R se realiza una ranura longitudinal, se introduce en la misma el hilo de calentamiento y el termopar del elemento de medición y se rellena, tanto con pasta térmica como con polvo de la propia muestra (este polvo se ha obtenido al hacer la ranura). La ranura tiene una profundidad aproximadamente igual al diámetro del hilo de calentamiento.

La pasta térmica elegida es un producto no corrosivo, que tiene unas propiedades dieléctricas cuyas características, a temperatura ambiente, se muestran en la Tabla 18. Se ha elegido este producto porque tiene una conductividad térmica de $0,67 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, valor prácticamente igual al de la muestra-patrón Macizo M5R.

Tabla 18. Características de la pasta térmica (Fuente: [MG Chemicals](#)).

Marca comercial	860 Silicone Heat Transfer Compound
Composición química	Polidimetilsiloxano, óxido de zinc y sílice
Densidad	2.300 kg/m ³
Conductividad térmica	0,67 W/m·K
Constante dieléctrica	3,81
Color	Blanco
Temperatura de trabajo	-40 a 200 °C

En la Figura 23 pueden verse, alojados en la ranura del ladrillo inferior de la muestra-patrón Macizo M5R, el hilo de calentamiento y el termopar del elemento de medición, así como parte del relleno con polvo de la propia muestra.

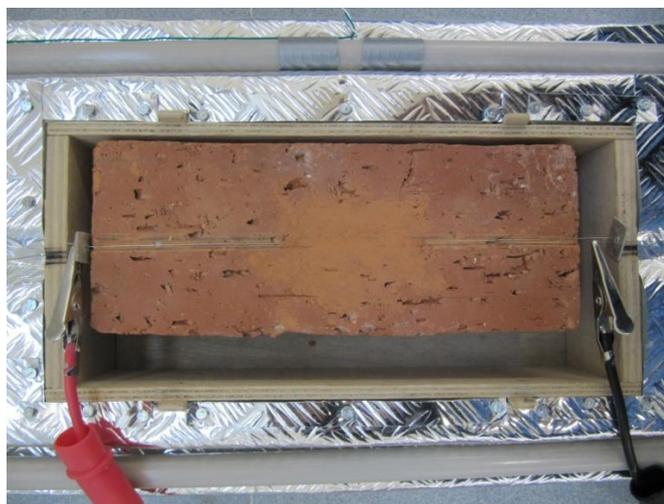


Figura 23 Ranura parcialmente rellena con polvo de la muestra Macizo M5R.

4.1.9.7 Medida de la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos de uso común

Para completar la etapa de validación del equipo MCT Se ha medido la conductividad térmica de 4 rellenos tradicionalmente usados en los sondeos geotérmicos, tales como bentonita, pasta de cemento, mortero de cemento con arena y mortero de cemento con bentonita.

4.1.9.7.1 Utilizando el equipo comercial Shotherm QTM-F1

Se ha utilizado el equipo Shotherm QTM-F1, perteneciente al Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Oviedo. Se trata de un equipo comercial, fabricado por la empresa japonesa Showa Denko K.K. y basado en el método THW.

Este equipo consta de cuatro componentes: unidad aritmética, unidad de fuente de potencia, unidad de control de potencia del horno y el propio horno (ANEXO V).

Como en esta tesis todas las medidas se hacen a temperatura ambiente, el horno se mantiene abierto, pues no se necesita encenderlo y, por tanto, no se usa la unidad de control de potencia del horno.

Tal como se aprecia en la Figura 24, para realizar el ensayo de medida de la conductividad térmica se ponen, en primer lugar, las dos probetas que forman la muestra dentro del horno, colocadas una a cada lado del elemento de medida.



Figura 24. Ensayo de la conductividad térmica de la muestra M 03 con el equipo comercial.

A continuación, se enciende el equipo con el interruptor situado en la unidad fuente de potencia y se espera 45 minutos a que estabilice.

Posteriormente, en la unidad aritmética se fija la intensidad eléctrica mediante el selector HEATER/A². Luego se pone el selector MODE en la posición CAL, se ajusta el cero con el selector ZERO ADJ. y se pulsa el botón START. Si en el display se muestra un valor comprendido entre 0,98 y 1,02 se pone el selector MODE en la posición CONV, se ajusta nuevamente el cero con el selector ZERO ADJ. y pasados 3 minutos se pulsa de nuevo el botón START. En caso contrario (el valor mostrado está fuera del rango 0,98-1,02), se pulsa el botón RESET y se siguen todos los pasos indicados, comenzando por poner el selector MODE en la posición CAL.

Transcurridos 2 minutos, el equipo muestra en el display el valor de la conductividad térmica de la muestra y la temperatura de realización del ensayo.

En todos los ensayos se determina la conductividad térmica aparente de la muestra seca. Para ello, antes de realizar los ensayos se dejan las muestras dentro de una estufa a 60 °C durante 5 días y luego se dejan a temperatura ambiente durante 48 horas, para que la temperatura de las mismas y la de la sala se equilibren.

Los ensayos de medida de la conductividad térmica se realizaron con las siguientes condiciones ambientales: 15-25 °C de temperatura y una humedad relativa del 55-65 %.

Previamente a la realización de las medidas, se hacen unas marcas en ambas probetas de cada muestra con el objeto de garantizar que en todos los ensayos estas estuviesen colocados en la misma posición.

Se realizaron tres ensayos de conductividad térmica por cada muestra, obteniéndose la media aritmética como resultado final.

4.1.9.7.2 Utilizando el equipo MCT

En la Figura 25 se muestra un ensayo de conductividad térmica sobre una muestra de relleno geotérmico de uso común.

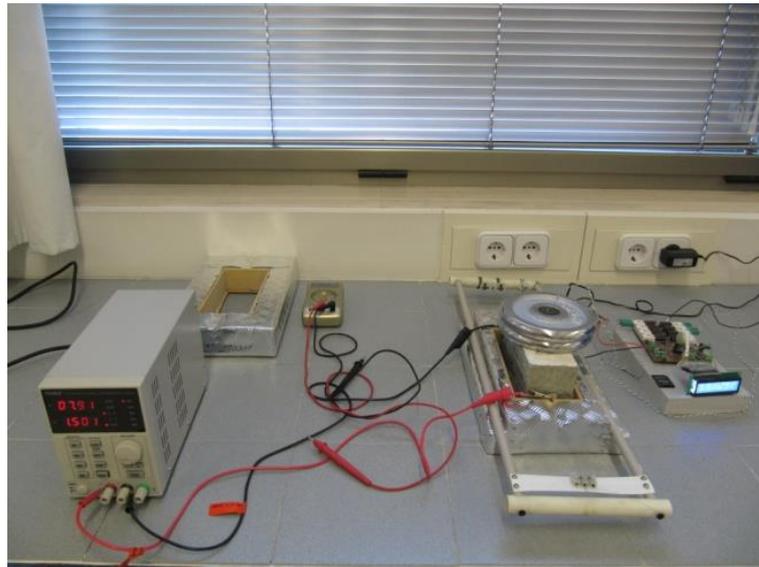


Figura 25. Ensayo de la conductividad térmica de la muestra M 02 con el equipo MCT.

Los ensayos se llevan a cabo utilizando los valores de intensidad eléctrica que se muestran en la Tabla 41, obtenida una vez validado el equipo.

Se realizaron tres ensayos de conductividad térmica por cada muestra, obteniéndose la media aritmética como resultado final.

4.1.10 Calibración del equipo MCT. Estimación de la incertidumbre de medida

El último paso del desarrollo del equipo MCT es su calibración.

Una vez validado el equipo MCT y comprobada la coherencia de las medidas obtenidas se lleva a cabo la calibración de este. Se han utilizado las 4 muestras-patrón de conductividad térmica conocida, con el fin de determinar la incertidumbre del equipo medida MCT y la corrección de calibración que debe aplicarse para compensar el bias o error sistemático del equipo.

El error sistemático del equipo MCT se obtiene restando al valor medio obtenido al medir cada muestra-patrón, el valor convencionalmente verdadero (valor nominal de la muestra-patrón) que se obtiene en los certificados de calibración.

A su vez, la corrección de calibración será igual al error sistemático, pero de signo contrario. La estimación de la incertidumbre de medida se realiza a partir de los datos de calibración.

4.2 Desarrollo del mortero geotérmico

En la presente tesis se ha desarrollado un mortero geotérmico de base cemento, denominado MG 7.

El mortero geotérmico MG 7 es un mortero seco (Figura 26), donde el 30 % de los áridos son artificiales (10 % colas de lavadero de fluorita, 10 % escoria blanca, 7 % cenizas volantes y 3 % microsílíce). El resto de componentes del mortero son cemento CEM I, arena sílicea, nanosílíce y superplastificante.



Figura 26. Mortero geotérmico seco MG 7.

En el desarrollo del mortero geotérmico, además de las propiedades térmicas, mecánicas, físicas y medioambientales, se ha tenido en cuenta la valorización, la disponibilidad y el coste económico de los materiales utilizados.

En el entorno en el que se desarrolla la investigación (Asturias, España) hay una empresa (MPD Fluorspar, del grupo Minersa) dedicada a la explotación de yacimientos de fluorita que cuenta con una planta de procesamiento. También hay una central térmica de carbón pulverizado y una central térmica de lecho fluido circulante.

4.2.1 Materiales

Tal como se ha visto en el capítulo 3, diversos autores ([Allan, 1997](#); [Berndt, 2010](#); [Borinaga Treviño et al., 2012 y 2013](#); [Young Sang et al., 2018 y 2020](#); [Dequan et al., 2020](#); [Tan Manh et al., 2020](#)) han utilizado en la formulación de los morteros geotérmicos varios residuos, tales como escorias de horno alto, escorias de convertidor BOF, escoria negra (escoria EAF), cenizas volantes, RCD o colas de lavadero procedentes de una mina de oro (minería metálica).

Estos morteros han sido desarrollados, principalmente, por equipos de investigación adscritos a centros universitarios. Sin embargo, no se han encontrado en la literatura científica morteros geotérmicos que hayan sido elaborados con colas de lavadero de minerales industriales, escoria blanca (escoria LF) o cenizas procedentes de centrales térmicas de lecho fluido. Tampoco se reportan en la literatura científica morteros geotérmicos en los que se utilice nanosílice.

Los materiales que en esta tesis se han empleado para el desarrollo del mortero geotérmico son: cemento Portland, 7 tipos de áridos (colas de lavadero, cenizas volantes, cenizas de fondo, microsílice, escoria blanca, residuos de construcción y demolición, y arena silícea), 2 tipos de adiciones (bentonita sódica y nanosílice), agua y aditivo.

Como puede verse, se han utilizado residuos de la construcción (residuos de construcción y demolición), de la industria energética (cenizas de fondo y cenizas volantes), de la industria metalúrgica (escoria blanca y microsílice) y de la industria minera (colas de lavadero).

Todos los materiales elegidos no se consideran residuos peligrosos, según la [Lista Europea de Residuos](#). Igualmente, no son corrosivos ni abrasivos, por lo que no producen corrosión ni desgaste anómalo en la bomba de inyección. Además, están fácilmente disponibles en el entorno en el que se desarrolla la investigación y tienen un coste económico bajo, con la excepción de la nanosílice.

4.2.1.1 Cemento

El cemento Portland utilizado tiene la designación EN 197-1 CEM I 42,5 R. Según la Instrucción para la recepción de cementos ([RC-16](#)), corresponde a un cemento común sin adiciones, con clase resistente 42,5 y alta resistencia inicial. Este cemento Portland gris procede de la empresa Cementos Tudela Veguín, del grupo [Masaveu](#). En la Tabla 19 se muestra la composición química del mismo, en % en peso.

Tabla 19. Composición química porcentual del cemento (Fuente: [Masaveu](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl ⁻
19,79	5,69	3,47	63,57	0,92	0,14	0,78	2,62	0,02

En función del porcentaje de Al₂O₃ y Fe₂O₃ se ha obtenido, conforme a la norma [UNE 80304](#), que el cemento tiene un 9,2 % de aluminato tricálcico (C₃A). Se ha seleccionado este cemento porque, como el contenido de SO₃ es muy pequeño (2,62 %), la posible expansión por el ataque de los sulfatos será mínima, tal como puede verse en [Baron y Ollivier \(1996\)](#).

4.2.1.2 Adiciones

Las adiciones empleadas son bentonita sódica (BS) y nanosílice (NS).

La bentonita sódica ha sido proporcionada por la empresa Sepiolsa del grupo [Minersa](#). En la Tabla 20 podemos ver la composición química, en % en peso.

Tabla 20. Composición química porcentual de la bentonita sódica (Fuente: [Minersa](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
57,91	23,07	5,83	0,59	1,49	0,03	3,26	0,46	0,10	0,37

Las principales ventajas que aporta la bentonita sódica son la reducción de la permeabilidad, de la exudación y de la segregación. Sin embargo, el principal inconveniente que tiene la bentonita es que no es un residuo.

Se emplea nanosílice pirogénica en polvo AEROSIL[®] 200, de la empresa [Evonik Industries](#). En la Tabla 21 se muestra la composición química, en % en peso.

Tabla 21. Composición química porcentual de la nanosílice (Fuente: [Evonik Industries](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂
99,80	0,05	0,03

Se ha seleccionado nanosílice porque reduce la porosidad, aumentando consecuentemente la conductividad térmica y la resistencia mecánica y disminuyendo la permeabilidad. Además, previene las reacciones RAS. También mejora la durabilidad frente a los ciclos de hielo-deshielo y aumenta la resistencia al ataque por sulfatos ([Alonso Domínguez, 2015](#)).

A su vez, se ha elegido nanosílice en polvo porque se quiere desarrollar un mortero geotérmico seco y porque además es mucho más efectiva que la nanosílice coloidal ([Moreno Bazán, 2018](#)).

El principal inconveniente de la nanosílice es su elevado precio y que además no es un residuo.

4.2.1.3 Áridos

Desde un principio, el objetivo era desarrollar un producto lo más ecológico posible, y esto pasa por utilizar, en la medida de lo posible, residuos industriales. Es por ello que, además de arena silíceo, se utilizan áridos artificiales y áridos reciclados, con el objeto de minimizar el impacto medioambiental y el consumo de nuevos recursos minerales.

Además, la mayoría de los áridos seleccionados no requieren ningún tipo de operación de trituración o molienda para su uso en la fabricación de morteros. De este modo, se minimizan los costes de operación y el impacto al medio ambiente.

En la Figura 27 pueden verse los distintos áridos que se han utilizado en las muestras. Tenemos en la parte superior los áridos de mayor granulometría, que de izquierda a derecha son: Residuos de Construcción y Demolición (RCD), arena silíceo (AS), cenizas de fondo (CF) y colas de lavadero de fluorita (CLF). En la parte inferior tenemos los áridos de menor granulometría, de izquierda a derecha: cenizas volantes de Aboño (CVA), cenizas volantes de La Pereda (CVP), escoria blanca (EB) y microsílice (MS).



Figura 27. Áridos utilizados en las muestras.

Las colas de lavadero proceden de la planta de tratamiento de fluorita que la empresa MPD Fluorspar, filial del grupo [Minersa](#), tiene en Asturias. En la Tabla 22 puede verse la composición química, en % en peso.

Tabla 22. Composición química porcentual de las colas de lavadero de fluorita (Fuente: [Minersa](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	BaO	SO ₃	MnO	Na ₂ O	K ₂ O
71,23	1,03	1,39	7,89	0,11	0,36	2,48	0,01	0,02	0,35

Se han seleccionado colas de lavadero de fluorita por su alto porcentaje en sílice, porque no tienen ningún uso o aplicación comercial y porque están formadas principalmente por material cristalino (cuarzo, calcita, barita y fluorita). Según [Callister \(2007\)](#), los materiales cristalinos conducen mejor el calor que los materiales amorfos.

La escoria blanca procede de la factoría de [ArcelorMittal](#) en Zaragoza. Se ha seleccionado escoria blanca porque es casi completamente cristalina, debido al lento enfriamiento, y porque prácticamente no tiene aplicación comercial. En particular, se ha elegido la de la factoría de [ArcelorMittal](#) en Zaragoza porque en esa planta no se utiliza dolomita como fundente, y de este modo el contenido de MgO libre disminuye, y en consecuencia también disminuye la posibilidad de producirse expansión volumétrica debida a la hidratación del MgO ([Herrero Vázquez, 2015](#)). En la Tabla 23 se indica la composición química, en % en peso.

Tabla 23. Composición química porcentual de la escoria blanca (Fuente: [ArcelorMittal](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
24,17	4,11	0,99	59,87	2,83	0,27	0,01	0,01	0,37

Las cenizas volantes proceden de la Central Térmica de Aboño (Asturias), perteneciente al grupo [EDP](#) y de la Central Térmica de La Pereda (Asturias) del grupo [Hunosa](#). Esta última es una central de lecho fluido circulante, mientras que la primera es una central convencional de carbón pulverizado. Ambas cenizas se diferencian en la forma y granulometría, la composición química y el color. También se diferencian en la composición mineralógica pues, aunque ambas son mayormente amorfas, los minerales principales de las cenizas volantes de Aboño son cuarzo y mullita, mientras que las cenizas volantes de La Pereda además de estos, también tienen un contenido importante de anhidrita e illita. Según la composición química, las cenizas volantes de Aboño son silíceas y las cenizas volantes de La Pereda son calcáreas.

Las cenizas de fondo también proceden de la Central Térmica de La Pereda (Mieres).

Se utilizan cenizas volantes porque aumentan la docilidad del mortero y mejora la resistencia a los sulfatos. También previene las reacciones RAS y disminuyen la segregación y exudación. Además, reducen el calor de hidratación del mortero, por lo que se reduce el peligro de fisuración superficial ([Monteagudo Viera, 2014](#)).

Se han seleccionado las cenizas volantes y las cenizas de fondo de la central térmica de La Pereda porque es la única central de combustión en lecho fluido circulante que hay en España y sus cenizas de fondo y cenizas volantes tienen la particularidad de contener anhidrita (CaSO₄), que se produce al reaccionar el dióxido de azufre (SO₂) de los gases de combustión con el óxido de calcio (CaO) procedente de la calcinación de la caliza que, junto con el carbón, los finos de lavadero y los estériles de escombrera, se introduce en la caldera de la central termoeléctrica ([Sánchez Naranjo, 2010](#); [Abad Valle, 2011](#)).

En la Tabla 24 se presenta la composición química, en % en peso, de las cenizas volantes de Aboño (CVA), de las cenizas volantes de La Pereda (CVP) y de las cenizas de fondo (CF).

Tabla 24. Composición química porcentual de las cenizas (Fuente: [EDP](#) y [Hunosa](#)).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
CVA	51,84	23,99	10,58	4,85	1,43	0,06	0,83	2,29	0,30	1,03
CVP	46,1	23,1	4,23	10,31	1,81	0,09	0,57	3,16	4,91	0,41
CF	45,6	23,9	4,47	10,14	2,11	0,11	0,98	3,29	1,87	0,49

Puede verse que la composición química de CVP y CF es prácticamente la misma, excepto el valor de SO₃.

La microsílíce procede de la fábrica de [FerroAtlántica](#) en Cee (La Coruña). En la Tabla 25 se muestra la composición química, en % en peso.

Tabla 25. Composición química porcentual de la microsílíce (Fuente: [FerroAtlántica](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
95,11	0,41	1,23	0,16	0,31	0,11	0,25	0,39	0,15	0,01

La microsílíce se ha empleado debido a que mejora la resistencia a los sulfatos y reduce la permeabilidad, la exudación y la segregación. Además, previene las reacciones RAS y mejora la durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo ([Monteagudo Viera, 2014](#)). También incrementa la resistencia mecánica.

Los residuos de construcción y demolición proceden de la empresa [Reciclajes de Santiago S.L.](#) Este material procede mayoritariamente de escombros de hormigones donde el árido es silíceo. En la Tabla 26 se indica la composición química, en % en peso.

Tabla 26. Composición química porcentual de los RCD (Fuente: [Reciclajes de Santiago S.L.](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
58,39	16,41	2,79	5,16	1,49	0,11	2,11	3,79	1,61	0,29

También se ha utilizado arena silíceo, a pesar de que se trata de un árido natural. Esta arena fue proporcionada por la empresa [Cantera Grado S.L.](#) En la Tabla 27 se muestra la composición química, en % en peso.

Tabla 27. Composición química porcentual de la arena silíceo (Fuente: [Cantera Grado S.L.](#)).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O
93,34	3,04	2,31	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04

Se selecciona arena silíceo porque aporta mayor conductividad térmica que la arena caliza y, a su vez, se emplea arena de cantera porque aporta mayor conductividad térmica que la arena procedente de arenero, donde las partículas son principalmente redondeadas.

La arena seleccionada al tener partículas angulosas proporciona un mortero más impermeable y con más resistencia mecánica, aunque menos dócil que si se emplea arena de partículas redondeadas.

4.2.1.4 Aditivo

Se ha seleccionado un aditivo en polvo ya que se pretende desarrollar un mortero geotérmico seco, es decir, un mortero predosificado al que en obra solo haya que añadirle agua.

El aditivo utilizado es el superplastificante en polvo MasterCast 205 MA, cuyas características se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Características del aditivo MasterCast 205 MA (Fuente: [Master Builders Solutions](#)).

Base química	Policarboxílico
Densidad	870 kg/m ³
pH	6 ± 1
Contenido en cloruros	< 0,1 %
Aspecto físico	Polvo beige

4.2.1.5 Agua

En el amasado de todas las muestras se ha utilizado agua potable, procedente de la red pública de Oviedo.

4.2.1.6 Granulométrica

El análisis granulométrico de los áridos de mayor granulometría (CF, CLF, RCD y AS) se realiza en seco con una tamizadora electromagnética AS 300 de la marca Retsch.

Para los áridos de menor granulometría (CVP, CVA, EB y MS) se ha utilizado un equipo de difracción láser HELOS/RODOS Sympatec (Figura 28). Previamente a la realización del análisis granulométrico se han secado las muestras en una estufa a 105 °C.



Figura 28. Equipo de difracción láser para el ensayo granulométrico de CVP, CVA, EB y MS.

En la Tabla 29 se puede observar la distribución granulométrica realizada mediante tamizado en vía seca, siguiendo la norma [UNE-EN 933-1](#). Se han utilizado una serie de tamices con luz de malla indicada en la norma [UNE-EN 933-2](#).

Como se puede observar el tamaño máximo de CF, RCD y AS es 2 mm, mientras que el de CLF es 0,5 mm.

Tabla 29. Distribución granulométrica de CF, CLF, RCD y AS.

Luz de malla [mm]	% Pasante acumulado			
	CF	CLF	RCD	AS
2	100,00	100,00	100,00	100,00
1	82,36	100,00	82,08	73,64
0,5	53,36	100,00	56,60	31,72
0,25	20,04	98,76	29,12	5,40
0,125	11,28	52,84	16,76	3,04
0,063	4,80	24,68	13,04	1,00

En la Tabla 30 puede verse la distribución granulométrica obtenida con el equipo de difracción láser. Se observa que el árido con menor tamaño es el MS, donde el 99,04 % es menor a 60 μm e incluso el 18,05 % tiene un tamaño menor de 1,80 μm .

Tabla 30. Distribución granulométrica de CVP, CVA, EB y MS.

Tamaño de partícula [μm]	% Pasante acumulado			
	CVP	CVA	EB	MS
122	100,00	100,00	100,00	100,00
60	78,79	90,46	88,00	99,04
30	49,87	72,79	61,08	94,93
15	23,14	51,99	31,12	87,62
7,40	5,43	26,18	10,76	71,34
3,60	2,31	11,35	4,35	40,85
1,80	0,93	4,92	2,05	18,05

4.2.2 Diseño y fabricación de las muestras

Se ha comenzado realizando 30 muestras (mezclas iniciales) con diferentes dosificaciones.

En función de los resultados y conclusiones obtenidos en las mezclas iniciales se han elaborado otras 7 muestras (morteros geotérmicos candidatos). Por tanto, se han hecho un total de 37 muestras, a lo largo de dos etapas consecutivas.

Del estudio de las 37 muestras en estado fresco, una vez endurecidas y también según sea el tiempo de trabajabilidad, se han establecido un conjunto de observaciones. Relacionada con dichas observaciones también se ha hecho una valoración final que plasma numéricamente el comportamiento observado en las muestras. Mediante dicha valoración se puntúan, en una escala de 0 a 10, aspectos subjetivos como la docilidad obtenida y aspectos objetivos como la cantidad de agua requerida para el amasado, el tiempo de trabajabilidad, la aparición de fisuras o grietas, la resistencia mecánica y la presencia de exudación o retracción en la muestra.

La valoración final se establece con tres números. El primer número valora el comportamiento de la muestra en estado fresco (cantidad de agua de amasado, docilidad y exudación), el segundo valora el tiempo de trabajabilidad y el tercero valora el comportamiento de la muestra en estado endurecido (fisuración, agrietamiento, retracción y resistencia mecánica).

La docilidad, la presencia de exudación o de retracción y la aparición de fisuras o grietas se determinan visualmente. La docilidad se valora durante el amasado, la exudación se valora a las 3 horas de finalizar el amasado y la retracción, cohesión, fisuración y agrietamiento se valoran a los 28 días. La cantidad de agua requerida durante el amasado, el tiempo de trabajabilidad y la resistencia mecánica se determinan numéricamente.

La relación w/c máxima permitida será de 0,56. El tiempo de trabajabilidad de las muestras se mide utilizando un aparato de Vicat manual con una aguja de 50 mm de longitud (Figura 29.a), considerándose óptimo cuando esté entre 3 y 12 horas, tolerable si lo está entre 12-24 horas, reducido si es menor de 3 horas y elevado si es mayor de 24 horas. La resistencia mecánica se mide a la edad de 1 día, utilizando para ello un penetrómetro de bolsillo (Figura 29.b) con el que se determina si la resistencia a compresión simple es mayor o menor de 1 N/mm².

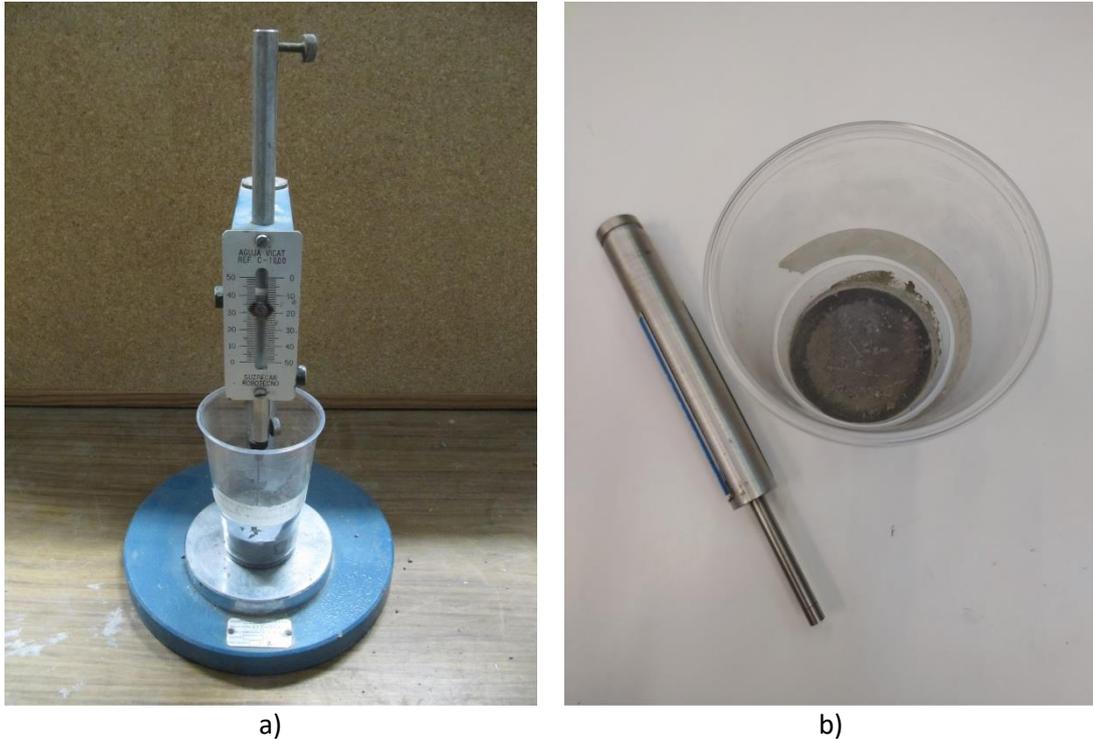


Figura 29. a) Aparato de Vicat manual. b) Penetrómetro de bolsillo.

Se ha considerado que el mortero geotérmico no debe comenzar a fraguar antes de 3 horas, para tener suficiente tiempo para llevar a cabo la puesta en obra del mortero en un sondeo geotérmico convencional de 150 mm de diámetro, con 150 m de profundidad y utilizando una bomba de inyección convencional de 20 l/min.

Se ha tomado como valor de referencia 1 N/mm² a la edad de 1 día, porque se considera que es la mínima resistencia a compresión que tiene una roca ([ISRM, 1981](#)). Además, una vez terminada la puesta en obra del mortero, este debe endurecer lo antes posible para resistir los empujes del terreno y para minimizar el arrastre de mortero fresco, debido a la comunicación hidráulica entre acuíferos o la circulación que pudiera producir un bombeo situado en las proximidades.

En resumen, se han establecido unos criterios de valoración y a partir de las conclusiones obtenidas en cada etapa se elaboran las nuevas mezclas de la siguiente etapa, teniendo en cuenta el parámetro más debilitado y el que tiene más potencial.

Para la fabricación de las 37 muestras, los componentes se pesan en una balanza analítica COBOS HT-220, para obtener las dosificaciones previamente establecidas. Más tarde los materiales sólidos ya pesados se mezclan en un molde formado por un vaso de plástico. Seguidamente, se añade el agua y se amasa manualmente hasta conseguir una mezcla homogénea, exenta de grumos y de consistencia fluida. Todas las muestras endurecen en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa.

Para la codificación de las 30 mezclas iniciales se ha utilizado una nomenclatura compuesta por la letra M seguida de un número. Para codificar los 7 morteros geotérmicos candidatos la nomenclatura está compuesta por las letras MG seguidas de un número.

Las dosificaciones de los diversos componentes utilizados en las muestras se indican a través de la relación aditivo/árido (r/s), la relación aditivo/adición (r/b), la relación aditivo/cemento (r/c), la relación agua/árido (w/s), la relación agua/adición (w/b), la relación agua/cemento (w/c), la relación árido/cemento (s/c) y la relación adición/cemento (b/c).

A continuación, se muestran los nombre, componentes, dosificación, resultados, valoración y conclusiones obtenidas en cada una de las dos etapas de diseño.

4.2.2.1 Mezclas iniciales

En todas las mezclas se emplea cemento (CEM I) y superplastificante (sp).

Se hicieron varios ensayos previos para determinar la dosificación del superplastificante con el fin de obtener muestras de consistencia fluida con una relación w/c máxima de 0,56. El valor elegido es el 1 % respecto al peso del conglomerante, que corresponde a una relación (r/c) de 0,01.

En la Tabla 31 figura el nombre y los materiales de las 30 mezclas iniciales.

Tabla 31. Nombre y componentes de las mezclas iniciales.

Nombre	Materiales			
	Cemento	Áridos	Adición	Aditivo
	c	s	b	r
M 11	CEM I	CF	---	sp
M 12	CEM I	CF	---	sp
M 13	CEM I	CF	---	sp
M 14	CEM I	CLF	---	sp
M 15	CEM I	CLF	---	sp
M 16	CEM I	CLF	---	sp
M 17	CEM I	RCD	---	sp
M 18	CEM I	RCD	---	sp
M 19	CEM I	RCD	---	sp
M 20	CEM I	AS	---	sp
M 21	CEM I	AS	---	sp
M 22	CEM I	AS	---	sp
M 23	CEM I	CVP	---	sp
M 24	CEM I	CVP	---	sp
M 25	CEM I	CVP	---	sp
M 26	CEM I	CVA	---	sp
M 27	CEM I	CVA	---	sp
M 28	CEM I	CVA	---	sp
M 29	CEM I	EB	---	sp
M 30	CEM I	EB	---	sp
M 31	CEM I	EB	---	sp
M 32	CEM I	MS	---	sp
M 33	CEM I	MS	---	sp
M 34	CEM I	MS	---	sp
M 35	CEM I	---	BS	sp
M 36	CEM I	---	BS	sp
M 37	CEM I	---	BS	sp
M 38	CEM I	---	NS	sp
M 39	CEM I	---	NS	sp
M 40	CEM I	---	NS	sp

En la Tabla 32 puede verse el nombre y la dosificación, en peso, de las 30 mezclas iniciales.

Tabla 32. Nombre y dosificación de las mezclas iniciales.

Nombre	Dosificación		
	s/c	b/c	r/c
M 11	1,00	---	0,01
M 12	2,00	---	0,01
M 13	2,50	---	0,01
M 14	1,00	---	0,01
M 15	2,00	---	0,01
M 16	2,50	---	0,01
M 17	1,00	---	0,01
M 18	2,00	---	0,01
M 19	2,50	---	0,01
M 20	1,00	---	0,01
M 21	2,00	---	0,01
M 22	2,50	---	0,01
M 23	0,20	---	0,01
M 24	0,10	---	0,01
M 25	0,03	---	0,01
M 26	0,20	---	0,01
M 27	0,10	---	0,01
M 28	0,03	---	0,01
M 29	0,20	---	0,01
M 30	0,10	---	0,01
M 31	0,03	---	0,01
M 32	0,20	---	0,01
M 33	0,10	---	0,01
M 34	0,03	---	0,01
M 35	---	0,20	0,01
M 36	---	0,10	0,01
M 37	---	0,03	0,01
M 38	---	0,20	0,01
M 39	---	0,10	0,01
M 40	---	0,03	0,01

Para los áridos de mayor granulometría (CF, CLF, RCD y AS) se han hecho las muestras con dosificaciones, respecto al cemento, del 100 %, el 200 % y el 250 %. Para los componentes de menor granulometría (CVP, CVA, EB, MS, BS y NS) las dosificaciones elegidas respecto al cemento han sido del 20 %, el 10 % y el 3 %.

En la Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos en la inspección visual.

Tabla 33. Inspección visual de las mezclas iniciales.

Nombre	Inspección visual				
	Amasado Docilidad	3 horas Exudación	28 días		
			Agrietamiento	Fisuración	Retracción
M 11	Regular	No	No	No	No
M 12	Mala	Sí	No	No	No
M 13	Mala	Sí	No	No	No
M 14	Regular	No	No	No	No
M 15	Regular	No	No	No	No
M 16	Mala	Sí	No	No	No
M 17	Regular	No	No	No	No
M 18	Regular	No	No	No	No
M 19	Mala	No	No	No	No
M 20	Regular	No	No	No	No
M 21	Regular	No	No	No	No
M 22	Mala	Sí	No	No	No
M 23	Regular	No	No	No	No
M 24	Regular	No	No	No	No
M 25	Buena	No	No	No	No
M 26	Buena	No	No	No	No
M 27	Buena	No	No	No	No
M 28	Buena	No	No	No	No
M 29	Buena	No	No	No	No
M 30	Buena	No	No	No	No
M 31	Buena	No	No	No	No
M 32	Regular	No	No	No	No
M 33	Buena	No	No	No	No
M 34	Buena	No	No	No	No
M 35	Regular	No	No	No	No
M 36	Buena	No	No	No	No
M 37	Buena	No	No	No	No
M 38	Regular	No	No	No	No
M 39	Regular	No	No	No	No
M 40	Buena	No	No	No	No

En la Tabla 34 figuran los valores de agua de amasado, tiempo de trabajabilidad, resistencia a compresión simple a la edad de 1 día y valoración final de las 30 mezclas iniciales.

Tabla 34. Valores numéricos y valoración final de las mezclas iniciales.

Nombre	Agua de amasado	Tiempo de trabajabilidad [h]	Compresión simple a 1 día [N/mm ²]	Valoración (0-10)		
M 11	w/c=0,48	3-12	≥ 1	6	10	10
M 12	w/c=0,80	3-12	≥ 1	3	10	9
M 13	w/c=0,95	3-12	≥ 1	3	10	9
M 14	w/c=0,40	3-12	≥ 1	6	10	10
M 15	w/c=0,56	3-12	≥ 1	6	10	9
M 16	w/c=0,85	3-12	≥ 1	3	10	9
M 17	w/c=0,52	3-12	≥ 1	6	10	10
M 18	w/c=0,56	3-12	≥ 1	6	10	9
M 19	w/c=0,80	3-12	≥ 1	3	10	9
M 20	w/c=0,37	3-12	≥ 1	6	10	10
M 21	w/c=0,46	3-12	≥ 1	6	10	10
M 22	w/c=0,65	3-12	≥ 1	3	10	10
M 23	w/c=0,57	3-12	≥ 1	4	10	10
M 24	w/c=0,45	3-12	≥ 1	6	10	10
M 25	w/c=0,30	3-12	≥ 1	9	10	10
M 26	w/c=0,31	3-12	≥ 1	10	10	10
M 27	w/c=0,29	3-12	≥ 1	10	10	10
M 28	w/c=0,26	3-12	≥ 1	10	10	10
M 29	w/c=0,32	3-12	≥ 1	10	10	10
M 30	w/c=0,28	3-12	≥ 1	10	10	10
M 31	w/c=0,26	3-12	≥ 1	10	10	10
M 32	w/c=0,62	3-12	≥ 1	4	10	10
M 33	w/c=0,40	3-12	≥ 1	8	10	10
M 34	w/c=0,29	3-12	≥ 1	10	10	10
M 35	w/c=0,50	3-12	≥ 1	6	9	9
M 36	w/c=0,38	3-12	≥ 1	8	10	9
M 37	w/c=0,28	3-12	≥ 1	10	10	10
M 38	w/c=0,66	12-24	≥ 1	4	8	10
M 39	w/c=0,43	3-12	≥ 1	6	10	10
M 40	w/c=0,32	3-12	≥ 1	10	10	10

Las conclusiones más destacables de las mezclas iniciales son las siguientes:

- Las mezclas con cenizas volantes de Aboño tienen mucha más docilidad y requieren mucha menos agua de amasado que las mezclas con cenizas volantes de La Pereda.
- La mezcla M 38 ha sido la que más ha tardado en fraguar. Aun así, presenta un tiempo de trabajabilidad tolerable. El resto de mezclas presentan un tiempo de trabajabilidad óptimo.
- Todas las mezclas tienen una excelente respuesta mecánica (buena resistencia y sin retracción, agrietamiento ni fisuración).
- Dentro de las mezclas con los áridos de mayor granulometría, las que tienen cenizas de fondo han sido las que han requerido mayor cantidad de agua, así es que las cenizas de fondo solo han mostrado un comportamiento global aceptable cuando $s/c = 1$.
- Las mezclas que llevan colas de lavadero, residuos de construcción y demolición y arena silíceas presentan un comportamiento global aceptable, tanto para $s/c = 1$ como para $s/c = 2$. Con la relación $s/c = 2,5$ se aprecian problemas de docilidad, exudación y/o exceso de agua de amasado.
- Las mezclas que llevan cenizas volantes de Aboño o escoria blanca tienen muy buen comportamiento global, incluso para una relación $s/c = 0,20$.
- En las mezclas que llevan microsílíce o bentonita sódica el comportamiento global es bueno para una relación $s/c \leq 0,10$. Con la relación $s/c = 0,20$ empeora bastante la docilidad y/o hay exceso de agua de amasado.
- En las mezclas que llevan nanosílíce el comportamiento global es bueno solo para una relación $s/c = 0,03$. Con la relación $s/c = 0,10$ y $s/c = 0,20$ empeora bastante la docilidad y/o hay exceso de agua de amasado.

4.2.2.2 Morteros candidatos

En base a las conclusiones que se han obtenido en las mezclas iniciales se realizan 7 morteros denominados "candidatos", formados por un árido principal (el que está en mayor porcentaje) y varios áridos minoritarios.

En los morteros MG 1, MG 2, MG 3 y MG 4 el árido principal es, respectivamente, cada uno de los cuatro áridos con mayor granulometría (CF, CLF, RCD y AS).

Los morteros M 5, MG 6 y MG 7 combinan AS y CLF, ya que son los dos áridos que en base a su composición mineralógica (principalmente cuarzo cristalino) deberían tener mayor conductividad térmica.

Como se ha visto, el mejor comportamiento para la muestra MG 1 se corresponde con una relación $s/c = 1$. Las muestras MG 2, MG 3, MG 4, MG 5, MG 6 y MG 7 se han hecho con una relación $s/c = 2$, con el fin de obtener una conductividad térmica mayor, pues en general cuanto mayor sea la proporción de áridos, mayor será la conductividad térmica.

Con el objeto de aumentar la durabilidad y la resistencia mecánica, y al mismo tiempo, reducir la segregación, permeabilidad y exudación se utiliza EB, CVA y MS en los 7 morteros candidatos, pero con un límite del 20 % sobre el peso total de áridos para no aumentar la demanda de agua, el tiempo de fraguado y la retracción.

Con el fin de reducir la porosidad y, por tanto, aumentar la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la impermeabilidad se utiliza NS en los 7 morteros candidatos, pero con un límite del 2 % sobre el peso total de cemento para no aumentar la demanda de agua, el tiempo de fraguado y la retracción.

Según [Alonso Domínguez \(2015\)](#) la combinación de microsílíce y nanosílíce tiene un efecto sinérgico, generándose mayor cantidad de geles C-S-H secundarios que producen una pasta de cemento más compacta.

Por otra parte, se ha prescindido de la bentonita porque no es un residuo industrial y además las propiedades que aporta se consiguen con la microsílíce, pues se ha observado que ambos materiales dan a las mezclas un comportamiento muy similar.

En la Tabla 35 se indica el nombre y los materiales utilizados en los 7 morteros candidatos.

Tabla 35. Nombre y materiales de los morteros candidatos.

Nombre	Materiales							
	Cemento	Áridos					Adición	Aditivo
	c	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	b	r
MG 1	CEM I	CF	CVA	EB	MS	---	NS	sp
MG 2	CEM I	CLF	CVA	EB	MS	---	NS	sp
MG 3	CEM I	RCD	CVA	EB	MS	---	NS	sp
MG 4	CEM I	AS	CVA	EB	MS	---	NS	sp
MG 5	CEM I	AS	CLF	CVA	EB	MS	NS	sp
MG 6	CEM I	AS	CLF	CVA	EB	MS	NS	sp
MG 7	CEM I	AS	CLF	CVA	EB	MS	NS	sp

Las dosificaciones de los áridos de los 7 morteros candidatos se han llevado a cabo buscando una granulometría continua y una elevada compacidad.

Se han ajustado por tanteo las curvas granulométricas a las curvas de Fuller correspondientes a los tamaños máximos de árido de 0,5 mm, para el mortero candidato MG 2, y 2 mm para los restantes morteros candidatos. Además, se hicieron varios ensayos previos en los que se determinó la dosificación del superplastificante para una relación w/c máxima de 0,56 y un tiempo de amasado no superior a 5 minutos. La cantidad de agua de amasado de todas las muestras es la necesaria para conseguir mezclas con consistencia fluida (> 200 mm, de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-6](#)).

En la Tabla 36 puede verse el nombre y la dosificación, en peso, de los 7 morteros candidatos.

Tabla 36. Nombre y dosificación de los morteros candidatos.

Nombre	Dosificación						
	s ₁ /c	s ₂ /c	s ₃ /c	s ₄ /c	s ₅ /c	b/c	r/c
MG 1	0,90	0,03	0,05	0,02	---	0,02	0,01
MG 2	1,80	0,06	0,10	0,04	---	0,02	0,01
MG 3	1,80	0,06	0,10	0,04	---	0,02	0,01
MG 4	1,60	0,14	0,20	0,06	---	0,02	0,01
MG 5	1,50	0,10	0,14	0,20	0,06	0,02	0,01
MG 6	1,20	0,40	0,14	0,20	0,06	0,02	0,01
MG 7	1,40	0,20	0,14	0,20	0,06	0,02	0,01

Los morteros MG 1, MG 2 y MG 3 llevan el 100 % de árido artificial.

En MG 1, MG 2 y MG 3 la suma de CVA, EB y MS es solo del 10 %, debido a que los áridos principales de estos morteros ya contienen bastante fracción fina. Mientras, en los morteros MG 4, MG 5, MG 6 y MG 7 esa suma es del 20 %.

El mortero MG 4 lleva el 20 % de árido artificial (7 % CVA, 10 % EB y 3 % MS), el mortero MG 5 lleva 25 % de árido artificial (5 % CLF, 7 % CVA, 10 % EB y 3 % MS), el mortero MG 7 lleva el 30 % de árido artificial (10 % CLF, 7 % CVA, 10 % EB y 3 % MS) y el mortero MG 6 lleva el 40 % de árido artificial (20 % CLF, 7 % CVA, 10 % EB y 3 % MS).

Los morteros MG 5, MG 6 y MG 7 se obtienen a partir de la muestra MG 4, sustituyendo AS por CLF.

En la Tabla 37 se muestran los resultados obtenidos en la inspección visual de los morteros candidatos.

Tabla 37. Inspección visual de los morteros candidatos.

Nombre	Inspección visual				
	Amasado	3 horas	28 días		
	Docilidad	Exudación	Agrietamiento	Fisuración	retracción
MG 1	Buena	No	No	No	No
MG 2	Buena	No	No	No	No
MG 3	Buena	No	No	No	No
MG 4	Buena	No	No	No	No
MG 5	Buena	No	No	No	No
MG 6	Buena	No	No	No	No
MG 7	Buena	No	No	No	No

En la Tabla 38 muestra los valores de agua de amasado, tiempo de trabajabilidad, resistencia a compresión simple a la edad de 1 día y valoración final de los 7 morteros candidatos.

Tabla 38. Valores numéricos y valoración final de los morteros candidatos.

Nombre	Agua de amasado	Tiempo de trabajabilidad [h]	Compresión simple a 1 día [N/mm ²]	Valoración (0-10)
MG 1	w/c=0,46	3-12	≥ 1	10 10 10
MG 2	w/c=0,54	3-12	≥ 1	10 10 10
MG 3	w/c=0,52	3-12	≥ 1	10 10 10
MG 4	w/c=0,44	3-12	≥ 1	10 10 10
MG 5	w/c=0,48	3-12	≥ 1	10 10 10
MG 6	w/c=0,55	3-12	≥ 1	10 10 10
MG 7	w/c=0,50	3-12	≥ 1	10 10 10

Puede observarse que los 7 morteros candidatos han obtenido la puntuación máxima en las valoraciones, ya que tienen un buen comportamiento físico y mecánico, pues no presentan exudación, agrietamiento, fisuración ni retracción apreciable visualmente, tiene una docilidad buena, un tiempo de trabajabilidad entre 3 y 12 horas, una resistencia a compresión simple a la edad de 1 día mayor o igual a 1 N/mm² y una relación w/c menor o igual a 0,56.

Por tanto, la conclusión más destacable de esta tercera etapa es que, en vista de los resultados obtenidos, no se descarta ninguno de los 7 morteros candidatos. Por lo tanto, todos ellos se someterán a los ensayos de conductividad térmica.

4.2.3 Ficha resumen de las muestras realizadas

Se han hecho 37 muestras, 30 de las cuales son mezclas iniciales y 7 son morteros candidatos (Figura 30).



Figura 30. Vista general de las muestras realizadas.

En el ANEXO VIII se adjunta una tabla donde figura el nombre, la vista en planta, la vista lateral y un resumen de las principales características observadas durante la realización de las 37 muestras.

4.2.4 Caracterización térmica de los morteros candidatos

Como los 7 morteros candidatos han tenido un comportamiento físico y mecánico adecuado, se sometieron al ensayo de conductividad térmica, utilizando el equipo MCT desarrollado en esta tesis.

Para ello, se han hecho unas muestras formadas por dos probetas de 180 mm x 70 mm x 50 mm (Figura 31). Estas dimensiones han sido determinadas durante la validación del equipo (Tabla 41).



Figura 31. Morteros geotérmicos candidatos.

La fabricación de las muestras se hace de manera análoga a la fabricación de las muestras de relleno geotérmico utilizadas en la validación (apartado 4.1.9.2.4).

En primer lugar, los componentes se pesan en una balanza de precisión, modelo Europe 3000 de la marca Gibertini, para obtener la dosificación establecida en cada muestra.

Más tarde, los distintos componentes se mezclan durante 5 minutos, mediante una amasadora planetaria de la marca ICON con 5 litros de capacidad, consiguiendo así una mezcla homogénea y exenta de grumos. El amasado se ha realizado siguiendo la norma [UNE-EN 196-1](#), con alguna ligera modificación. A continuación, la mezcla fresca se vierte en un molde de madera.

Posteriormente, las muestras se introducen en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa y se desmoldan a las 48 horas de su amasado. Luego, se introducen durante 7 días en un baño de agua para llevar a cabo su curado.

En todos los ensayos se ha determinado la conductividad térmica aparente de la muestra seca, a temperatura ambiente.

En la Tabla 39 se muestra el valor medio \bar{m} de los 3 ensayos de conductividad térmica realizados con el equipo MCT, la corrección de calibración aplicada C , la conductividad térmica corregida M y la incertidumbre expandida U_M para un factor de cobertura K igual a 2 (corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %)

Tabla 39. Conductividad térmica, corrección de calibración e incertidumbre expandida.

Nombre	\bar{m} [W/m·K]	C [W/m·K]	M [W/m·K]	$U_M (K=2)$ [W/m·K]
MG 1	1,05	-0,03	1,02	0,05
MG 2	1,36	-0,04	1,32	0,05
MG 3	1,14	-0,04	1,10	0,05
MG 4	2,18	-0,06	2,12	0,08
MG 5	2,13	-0,06	2,07	0,08
MG 6	1,84	-0,05	1,79	0,07
MG 7	2,07	-0,06	2,01	0,08

Los valores de conductividad térmica corregida M de los 7 morteros geotérmicos candidatos se han obtenido aplicando la expresión [45], es decir, a cada valor medio \bar{m} de los 3 ensayos se le ha sumado la corrección de calibración C , obtenida con la Figura 66. El resultado de la medición tras la corrección es una estimación del valor del mensurando, dada la incertidumbre debida a los efectos aleatorios y a la corrección del resultado por efectos sistemáticos.

La incertidumbre expandida U_M se obtiene mediante la Figura 67, con un valor de n igual a 3.

Los morteros candidatos en los que el árido principal son CF (MG 1) y RCD (MG 3) tienen los valores de conductividad térmica más bajos.

El mortero geotérmico MG 2, cuyo árido principal son CLF, es el que tiene mayor conductividad térmica de entre los morteros que llevan 100 % árido artificial, pero aun así el valor obtenido es relativamente bajo (1,32 W/m·K).

En la Figura 32 se expone el intervalo de confianza (con una probabilidad de aproximadamente el 95 %) de la conductividad térmica corregida M de los 7 morteros geotérmicos candidatos.

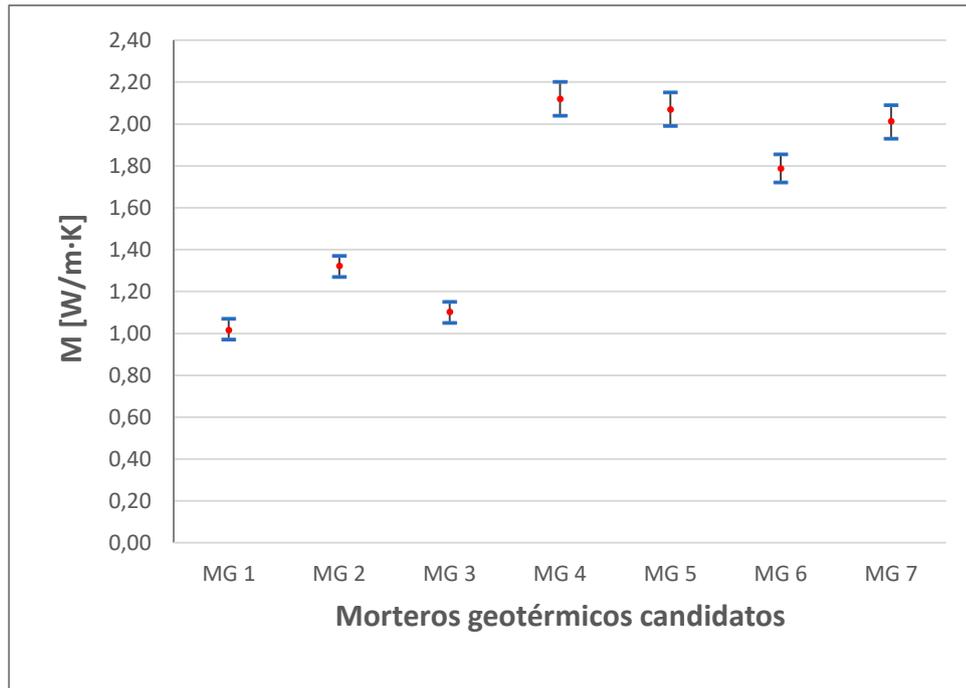


Figura 32. Intervalos de confianza de la conductividad térmica de los 7 morteros candidatos.

Según lo esperado los valores de conductividad térmica más elevados son los correspondientes a las muestras que llevan AS (MG 4, MG 5, MG 6 y MG 7). En la Figura 33 se representa la conductividad térmica corregida M y el porcentaje de árido artificial de estas 4 muestras. Se puede observar que la conductividad térmica disminuye cuanto mayor es el porcentaje de árido artificial.

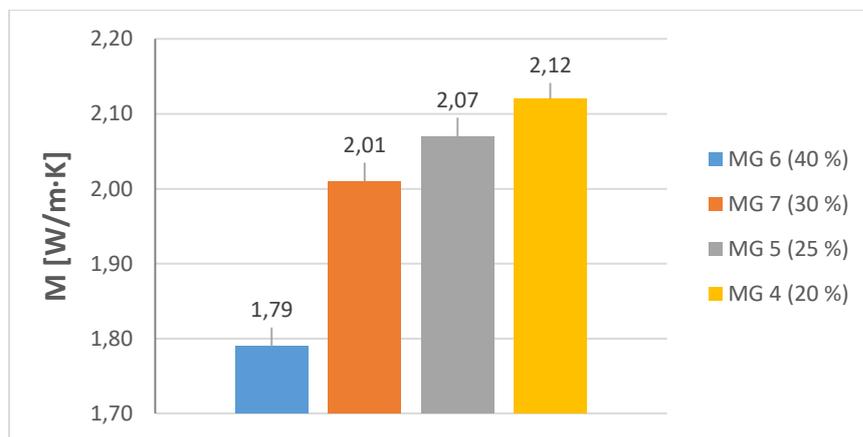


Figura 33. Conductividad térmica de MG 4, MG 5, MG 6 y MG 7 y porcentaje de árido artificial.

Tomando como referencia el mortero de mayor conductividad térmica (mortero MG 4), las conductividades térmicas del mortero MG 6, del mortero MG 7 y del mortero MG 5 son, respectivamente, un 15,56 %, un 5,19 % y un 2,36 % menores.

Finalmente, se elige como mortero geotérmico definitivo el MG 7, que con un valor de $2,01 \pm 0,08$ W/m·K (K=2), representa la solución de compromiso entre la conductividad térmica y la sostenibilidad medioambiental (porcentaje de árido artificial).

La [IGSHPA \(2016\)](#) recomienda que los morteros geotérmicos tengan conductividades térmicas con un valor de al menos 1,3 W/m·K. La norma [UNE 100715-1](#) es más restrictiva, pues establece una conductividad térmica de al menos 2 W/m·K, cuando el terreno tenga una conductividad térmica mayor o igual a 2 W/m·K.

4.2.5 Caracterización del mortero geotérmico definitivo

Los morteros usados en sondeos geotérmicos de muy baja temperatura, además de presentar una elevada conductividad térmica, que permita una adecuada transferencia de calor, deben tener otras características.

Debido a ello, al mortero MG 7 se le han realizado los siguientes ensayos para completar su caracterización: granulométrico, consistencia, tiempo de fraguado, exudación, densidad aparente, porosidad abierta, resistencia a compresión, resistencia a flexión, homogeneidad, retracción lineal, coeficiente de permeabilidad, adherencia entre el mortero y la tubería, durabilidad, análisis químico, análisis mineralógico, análisis microestructural y estudio del impacto medioambiental.

4.2.5.1 Análisis granulométrico

La distribución granulométrica de los áridos del mortero geotérmico MG 7 se ha realizado conforme a la norma [UNE-EN 1015-1](#). El tamizado se hace en seco, utilizando una tamizadora electromagnética AS 200 de la marca Retsch (Figura 34), para una muestra representativa de 200 gramos. Previamente, la muestra se ha secado en una estufa a 105 °C.



Figura 34. Tamizadora electromagnética con la columna de tamices.

4.2.5.2 Determinación de la consistencia

La consistencia es una medida de la fluidez del mortero fresco.

El ensayo de consistencia se ha llevado a cabo en una mesa de sacudidas manual con un disco de 300 mm de diámetro (Figura 35.a), de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-3](#). Esta mesa de sacudidas es de la marca Mecanizados MEF.

Se vierte el mortero fresco en un molde troncocónico de latón de 60 mm de altura. Se levanta verticalmente el molde y se imprimen 15 sacudidas a la mesa, con una frecuencia aproximada de una sacudida por segundo. Seguidamente se mide el valor del escurrimiento (Figura 35.b).



Figura 35. a) Mesa de sacudidas y molde troncocónico. b) Realización del ensayo.

4.2.5.3 Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado se determina mediante la penetración en el mortero de una aguja de 50 mm de longitud y 1,3 mm de diámetro, siguiendo el procedimiento indicado en la norma [UNE-EN 480-2](#), con alguna ligera modificación. La fabricación del mortero fresco y preparación de la muestra de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Para realizar el ensayo se ha utilizado un aparato de Vicat automático, de la marca Ibertest (Figura 36). Se ha utilizado un molde cilíndrico de plástico y las penetraciones se han realizado cada 10 minutos.



Figura 36. Aparato de Vicat automático durante el ensayo.

4.2.5.4 Determinación de la exudación

Para determinar la cantidad de agua de amasado del mortero que es susceptible de exudar se ha seguido el procedimiento descrito en la norma [ASTM C940-98a](#). La fabricación del mortero fresco y la preparación de la muestra de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Se utiliza una probeta graduada de 1.000 ml, dentro de la cual se introducen 800 ml de mortero fresco (Figura 37) y se cubre la probeta con papel film con el objeto de prevenir la evaporación del agua exudada. Se han realizado medidas cada 15 minutos durante 3 horas y se ha utilizado una pipeta para recoger el agua exudada.



Figura 37. Ensayo de exudación del mortero MG 7 fresco.

4.2.5.5 Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta

La determinación de la densidad aparente del mortero fresco se hace según se expone en la norma [UNE-EN 1015-6](#). Se emplea una balanza de precisión Gibertini Europe 3000 y el mismo recipiente metálico de 125 mm de diámetro interior y 1 litro de capacidad que se utiliza en la determinación del contenido en aire en el mortero fresco (Figura 38). La determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido se hace de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-10](#), con alguna ligera variación. Se preparan 2 probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm que se conservan 48 horas en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa y luego se desmoldan e introducen durante 7 días en un baño de agua para llevar a cabo su curado.



Figura 38. Balanza de precisión y recipiente para determinar la densidad aparente del MG 7.

En la balanza de precisión METTLER TOLEDO 12001M se obtiene la masa de la probeta seca (previamente ha estado en una estufa a 70 °C), la masa de la probeta húmeda y la masa de la probeta sumergida (Figura 39). Las medidas se anotan cuando se alcanza una masa constante.



Figura 39. Balanza de precisión y pesada hidrostática de la probeta de MG 7.

Con los valores de la masa de la probeta seca, húmeda y sumergida también se determina la porosidad abierta del mortero. En este caso siguiendo la norma [UNE-EN 993-1](#). La porosidad abierta es el cociente entre el volumen total de poros abiertos de la probeta y su volumen aparente. Se expresa en porcentaje del volumen aparente.

4.2.5.6 Determinación de la resistencia a flexión y a compresión

El procedimiento usado para determinar la resistencia a flexión y a compresión simple del mortero endurecido es el descrito en la norma [UNE-EN 1015-11](#).

Se preparan 3 probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm, que se conservan 48 horas en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa. Luego se desmoldan e introducen durante 5 días en un baño de agua para llevar a cabo su curado.

Las probetas se rompen a los 7 y 28 días de su confección en la máquina universal de ensayos de la marca Metrotec (Figura 40).



Figura 40. Máquina universal de ensayos.

Se trata de una máquina electromecánica de 200 kN con la que se ha aplicado la carga a una velocidad uniforme de 50 N/s para el ensayo a flexión y a una velocidad uniforme de 400 N/s para el ensayo a compresión.

4.2.5.7 Estudio de la homogeneidad

El estudio visual del grado de anisotropía y del grado de segregación del mortero endurecido se lleva a cabo utilizando una probeta cilíndrica, a la que se le da un corte longitudinal para poder observar a lo largo de la misma la distribución de las partículas de árido. La fabricación del mortero y preparación de la muestra de ensayo se realiza según la norma [UNE-EN 1015-2](#).

El molde (Figura 41) está formado por un tubo partido de PVC, con 50 cm de longitud y 5 cm de diámetro. A las 48 horas se desmolda el tubo partido y se introduce la probeta durante 7 días en un baño de agua para su curado. A los 15 días la probeta se corta longitudinalmente con una tronzadora (Figura 42).



Figura 41. Llenado del tubo de PVC.



Figura 42. Corte de la probeta.

4.2.5.8 Determinación de la retracción lineal

El procedimiento usado para medir la retracción lineal del mortero endurecido es el descrito en la norma [ASTM C490-07](#). La fabricación del mortero y preparación de las muestras de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Se preparan 3 probetas prismáticas utilizando unos moldes de 285 mm x 25 mm x 25 mm con unos cilindros metálicos de 6 mm de diámetro en los extremos. Las probetas se conservan 7 días en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa. Luego se desmoldan y se conservan en un armario a 20 °C y 50 % de humedad relativa. El seguimiento del ensayo se prolongó 90 días, registrándose las lecturas mediante un comparador de longitud (Figura 43).

Las lecturas se hicieron diariamente durante los primeros 15 días y semanalmente el resto. Se han hecho unas marcas en las probetas para poder hacer las medidas siempre con las probetas en la misma posición.



Figura 43. Ensayo de medida de la retracción lineal con el comparador de longitud.

4.2.5.9 Determinación del coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad (conductividad hidráulica) del mortero geotérmico endurecido se determina siguiendo la norma [ASTM D5084-90](#), con alguna ligera variación. La fabricación del mortero y preparación de las muestras de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Se preparan 2 probetas cilíndrica con unas dimensiones de 76,3 mm de longitud por 38,1 mm de diámetro. Estas probetas de mortero se conservan durante 24 horas en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa. Luego, se desmoldan e introducen durante 15 días en un baño de agua para su curado.

En la Figura 44 podemos ver la probeta cilíndrica y todo el material necesario para su montaje (la célula de metacrilato, la membrana de látex, los filtros de papel, las piedras porosas, etc.)



Figura 44. Probeta y material accesorio.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad se ha realizado el ensayo del permeámetro de pared flexible. Para ello se utiliza una célula de metacrilato (donde va montada la probeta de mortero) y la máquina multiensayo Trittech 100 de la marca Wykeham Farrance (donde se emplaza la célula de metacrilato) con la que se mide el volumen de agua que atraviesa la probeta y se aplican las presiones.

En la Figura 45.a puede verse el equipo completo durante la realización del ensayo. En la parte derecha (Figura 45.b) tenemos la probeta colocada en el interior de la célula de metacrilato.



a)



b)

Figura 45. a) Ensayo de permeabilidad. b) Célula de metacrilato con la probeta.

4.2.5.10 Determinación de la adherencia entre el mortero y la tubería

Para realizar este ensayo se ha diseñado un experimento consistente en determinar la tensión tangencial máxima entre el mortero MG 7 y la tubería, utilizando una prensa electromecánica de 100 kN.

La fabricación del mortero y preparación de la muestra de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

En primer lugar, con la ayuda de una taladradora de columna se hacen 32 agujeros de 3 mm de diámetro, uniformemente repartidos a lo largo de un tubo de PVC de 110 mm de diámetro exterior y 120 mm de longitud.

Dentro del tubo de PVC se coloca, de forma coaxial, un tubo de PEAD de 40 mm de diámetro exterior, 3,7 mm de espesor y 140 mm de longitud (Figura 46.a). Ambos tubos se introducen en un recipiente y se vierte agua hasta cubrir los agujeros del tubo de PVC que hace de molde del mortero (Figura 46.b).



Figura 46. a) Tubos. b) Montaje dentro del recipiente con agua.

Posteriormente, se vierte el mortero recién amasado y se cubre el recipiente con papel film para evitar la evaporación del agua. Con este montaje se somete al mortero a unas condiciones de fraguado y endurecimiento en permanente contacto con el agua, que generalmente es lo que ocurre en campo.

A los 28 días se retira el papel film y se saca del recipiente con agua el conjunto mortero-tubería (Figura 47).



Figura 47. Conjunto mortero-tubería.

Finalmente, mediante el uso de una prensa electromecánica de 100 kN, se aplica una carga vertical sobre el tubo coaxial de PEAD hasta superar la resistencia a la cizalladura (Figura 48). De este modo, se puede calcular la tensión tangencial máxima entre el mortero y la tubería embebida en el mismo.

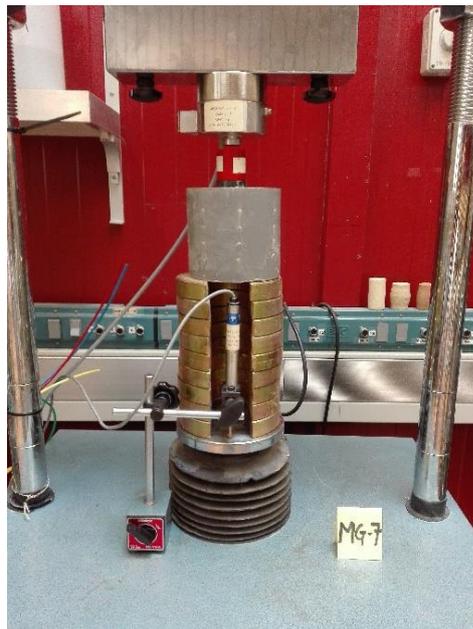


Figura 48. Ensayo de adherencia en la prensa de 100 kN.

4.2.5.11 Estudio de la durabilidad

Debido a la composición química y granulometría de los materiales utilizados en la formulación del mortero MG 7, no se han considerado las reacciones expansivas por el ataque por sulfatos, el ataque por reacciones RAS ni la hidratación retardada de la cal libre (CaO) o del óxido de magnesio (MgO).

Por lo tanto, para llevar a cabo el estudio de durabilidad del mortero endurecido se realizan ciclos de humedad-sequedad y ciclos de hielo-deshielo.

Para ambos ensayos, se preparan 8 probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm, que se conservan durante 48 horas en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa. Luego se desmoldan e introducen durante 15 días en un baño de agua para llevar a cabo su curado.

La fabricación del mortero y preparación de las muestras de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Para evaluar la degradación del mortero se han llevado a cabo 20 ciclos de humedad-sequedad y 20 ciclos de hielo-deshielo. En cada ciclo de humedad-sequedad se utilizan 3 probetas que se sumergen totalmente durante 24 horas en un baño termostático JP Selecta PRECISTERM con agua a 15 °C y, posteriormente, se introducen durante 24 horas en una estufa JP Selecta DIGITHEAT a 55 °C. En cada ciclo de hielo-deshielo se utilizan 3 probetas que se introducen en un frigorífico Liebherr LCexv 4010 a una temperatura de -18 °C durante 24 horas y, posteriormente, se sumergen durante 24 horas en un baño termostático JP Selecta PRECISTERM con agua a 15 °C que las cubre totalmente (Figura 49).

Los ciclos establecidos simulan las condiciones de trabajo del mortero geotérmico a lo largo del año, en cuanto a las variaciones del nivel freático y las temperaturas del fluido caloportador que circula por la tubería embebida en el mortero.

Para evaluar los efectos producidos, se observa la aparición de grietas, descamación, fisuras o desmoronamiento en las probetas y se determina la variación de peso de las mismas.

En la máquina universal de ensayos Metrotec también se lleva a cabo el ensayo de resistencia a flexión y compresión de las 8 probetas (las 3 utilizadas en los ciclos de humedad-sequedad, las 3 utilizadas en los ciclos de hielo-deshielo y 2 que se emplearán como referencia).



Figura 49. Probetas sumergidas en el baño termostático durante el ciclo de hielo-deshielo.

De esta forma, al comparar los resultados obtenidos en las 8 probetas se puede cuantificar la pérdida de resistencia mecánica del mortero cuando se somete a ciclos de humedad-sequedad y a ciclos de hielo-deshielo.

En la Figura 50 podemos ver el ensayo de resistencia a flexión de una probeta de mortero previamente sometida a ciclos de humedad-sequedad.



Figura 50. Ensayo de resistencia a flexión para el estudio de durabilidad del mortero.

4.2.5.12 Análisis químico

Para determinar la composición química del mortero seco se ha utilizado la técnica analítica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (XRF).

En esta técnica la muestra se irradia con un haz primario de rayos X, producidos por un tubo de rayos X, y emite fotones de rayos X que son característicos de los elementos presentes en la muestra.

Para realizar el análisis químico se preparó una muestra en polvo de 5 gramos de mortero seco, mediante molienda a un tamaño inferior a $45\ \mu\text{m}$, para determinar los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas.

La determinación de los elementos mayoritarios del mortero se realizó con el espectrómetro secuencial PHILIPS PW2404, basado en la Fluorescencia de Rayos X por Dispersión de Longitud de Onda (WDXRF), con cargador automático PW2540. El equipo (Figura 51) está dotado de un tubo de rayos X con ánodo de rodio (Rh) con 4 kW de potencia, 5 cristales analizadores (Fli 200, Fli 220, Pe, Ge y Px1) y 3 detectores: sellado de xenón, centelleo y flujo gaseoso.

El valor de la pérdida por calcinación (LOI) se determinó calcinando la muestra hasta una temperatura de $950\ ^\circ\text{C}$, manteniendo dicha temperatura durante 2 horas.



Figura 51. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda.

Para preparar la muestra a analizar en el espectrómetro PHILIPS PW2404 se ha utilizado la perladora eléctrica PHILIPS Perl'x 3, con la que se transforma el polvo de mortero a tamaño

inferior a 45 μm en una perla fundida. Para obtener la perla se necesitan 0,5 g de muestra y 6 g de tetraborato de litio (fundente).

Los elementos minoritarios y trazas del mortero se han determinado con el analizador portátil Niton XL3t, de la casa comercial Thermo Scientific (Figura 52). Este espectrómetro, basado en la Fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersiva (EDXRF), está dotado de un tubo de rayos X con ánodo de oro (Au) de 50 kV.



Figura 52. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva.

4.2.5.13 Análisis mineralógico

La identificación de las especies minerales presentes en el mortero endurecido se lleva a cabo mediante la técnica analítica de Difracción de Rayos X (XRD).

En esta técnica cuando un haz de rayos X incide en una muestra de material cristalino, parte de los rayos lo atraviesan y parte son dispersados por los electrones de los átomos del material. La mayor parte de las ondas de los fotones dispersados interfieren y se anulan. En ciertas direcciones, sin embargo, los fotones salen en fase y sus ondas se refuerzan dando lugar a un haz de rayos X difractados.

La muestra y el detector del difractómetro girarán simultáneamente cambiando el ángulo, de este modo a medida que los diferentes planos se ajustan a la ley de Bragg ($n\lambda=2d\cdot\text{sen}\theta$) se produce la difracción. Ello permite identificar las fases cristalinas presentes en la muestra, puesto que el difractograma de cada fase cristalina es característico.

Para llevar a cabo el análisis mineralógico se ha preparado una muestra en polvo de 1 gramo de mortero endurecido, mediante molienda a un tamaño inferior a 45 μm . Dicho mortero tenía una edad de 28 días y se había fabricado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Para el análisis se ha utilizado el difractómetro de polvo PHILIPS XPERT PRO de la Figura 53. Este equipo está equipado con un tubo de ánodo de cobre (Cu), óptica de haz incidente con rendija programable de divergencia y atenuador de haz directo. El difractómetro consta de tres partes esenciales: el tubo de rayos X, un goniómetro y un detector.



Figura 53. Difractómetro de rayos X.

4.2.5.14 Análisis microestructural y microanálisis composicional

La microestructura del mortero endurecido se ha estudiado mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Mediante Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) se realiza el microanálisis químico.

En la técnica SEM se hace incidir un delgado haz de electrones acelerados sobre una muestra gruesa, opaca a los electrones. Este haz se focaliza sobre la superficie de la muestra de forma que realiza un barrido de la misma siguiendo una trayectoria de líneas paralelas y mediante unas lentes electromagnéticas se forma la imagen.

Para la realización del análisis se han preparado 3 muestras de 1 a 2 cm de diámetro, partiendo de una probeta de mortero con una edad de 28 días y fabricado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Para la observación se requiere que las muestras conduzcan la corriente eléctrica, por lo que fue necesario recubrir su superficie con una película muy fina de oro, de solo unos pocos nanómetros (nm), utilizado para ello el metalizador Balzers SCD 004 de la Figura 54.



Figura 54. Metalizador de oro.

La observación de las muestras se ha realizado con el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6610LV (Figura 55). Este equipo está equipado con un cañón de electrones de filamento de wolframio (W). Tiene posibilidad de trabajo de 0,5 a 30 kV, una resolución de 3 nm y hasta 50.000 aumentos.

El microscopio JEOL JSM-6610LV está dotado de detectores de electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BSE). Este microscopio además se complementa con un equipo de microanálisis EDX Inca energy-350 de la casa Oxford Instruments, con detector de rayos X modelo X-Max 50.



Figura 55. Microscopio electrónico de barrido con microanalizador EDX.

Cuando el haz de electrones alcanza la superficie de la muestra, algunos electrones se reflejan como electrones retrodispersados (BSE), otros liberan electrones secundarios (SE) y otros excitan la muestra produciéndose la emisión de rayos X.

Los electrones secundarios son electrones externos de los átomos de la muestra, arrancados durante la incidencia de los electrones primarios. Son emitidos por el material y provienen de capas situadas en la superficie hasta una profundidad que no excede algunos nanómetros.

Por su parte, los electrones retrodispersados son electrones primarios que han colisionado elásticamente con los núcleos de la muestra.

Los electrones secundarios revelan el contraste topográfico en la muestra, permitiendo así su análisis morfológico. Los electrones retrodispersados revelan el contraste composicional, en muestras que no tengan relieve.

En cuanto a los rayos X, estos tienen una energía y longitud de onda propias del material, lo que nos permite hacer un microanálisis químico.

4.2.5.15 Impacto medioambiental

Se ha determinado el impacto medioambiental que el mortero geotérmico pudiera producir en las aguas subterráneas.

Para ello, partiendo del correspondiente lixiviado, se ha determinado el pH, la conductividad eléctrica y la turbidez. También se realiza el análisis químico de este, mediante Espectrometría

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

de Emisión Óptica de Plasma de Acoplado Inductivamente y Espectrometría de Absorción Atómica, conocidas por sus siglas inglesas ICP-OES y AAS, respectivamente.

En primer lugar, se ha realizado un ensayo de lixiviación de una muestra monolítica siguiendo la norma [UNE-EN 15863](#), con algunas modificaciones.

La muestra monolítica es una probeta prismática de 160 mm x 40 mm x 40 mm, que se ha conservado 24 horas en una cámara húmeda a 20 °C y 95 % de humedad relativa. La fabricación del mortero y preparación de la muestra de ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma [UNE-EN 1015-2](#).

Posteriormente, la probeta de mortero geotérmico se desmolda e introduce en un tanque de lixiviación de vidrio. Este tanque se rellena con 2.000 ml de lixivante, de forma que la parte superior de la probeta de mortero quede sumergida al menos 2 cm y la separación de esta con las paredes del tanque sea también de 2 cm. Finalmente, se cierra el tanque de lixiviación.

El lixivante utilizado es agua destilada, con una temperatura constante en todo el ensayo de 20 °C.

A lo largo del ensayo de lixiviación se han realizado 4 etapas, con renovación de lixivante y recogida de eluato (agua obtenida en el ensayo de lixiviación) en un frasco de plástico. Las etapas se hicieron a los 3, 7, 30 y 60 días. Inmediatamente después de recoger el eluato se mide su pH y conductividad eléctrica. Solo se determina la turbidez y los elementos químicos del eluato recogido en la última etapa, es decir, a los 60 días.

A continuación, se describen los ensayos llevados a cabo para la caracterización organoléptica y fisico-química del eluato del mortero geotérmico MG 7.

4.2.5.15.1 Determinación del pH

El pH es la medida de la actividad de los iones hidrógeno en solución. La determinación del pH se hace de según se describe en la norma [UNE-EN ISO 10523](#).

Para obtener el valor de pH del eluato se utiliza el pH-metro Metrohm 913 de la Figura 56. Este equipo se ha calibrado usando dos soluciones buffer o tampón con pH conocido de valores 7 y 10.

Como pH de la muestra depende de la temperatura, este equipo da el valor de pH ya corregido a 25 °C.



Figura 56. Medición con el pH-metro.

4.2.5.15.2 Determinación de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida de la concentración de solutos ionizables presentes en el agua. Para su determinación se ha seguido la norma [UNE-EN 27888](#).

El valor de conductividad eléctrica del eluato se obtiene con el conductímetro Metrohm 712 de la Figura 57. El conductímetro se calibra con una solución patrón de KCl 0,01 N. Como la conductividad eléctrica de la muestra depende de la temperatura, este equipo da el valor de conductividad eléctrica ya corregido a 25 °C.



Figura 57. Medición con el conductímetro.

4.2.5.15.3 Determinación de la turbidez

La turbidez es la reducción de transparencia de un líquido causada por la presencia de materia no disuelta. Su determinación se realiza de acuerdo a la norma [UNE-EN ISO 7027-1](#).

La turbidez se determina cuantitativamente en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU).

Para realizar el ensayo se ha utilizado el turbidímetro HACH 2100N. Este equipo se ha calibrado utilizando 2 patrones de turbidez conocida (< 0,1 NTU y 20 NTU). En la Figura 58 se puede ver el turbidímetro durante el proceso de calibración, previo a la determinación de la turbidez del eluato.



Figura 58. Calibración del turbidímetro.

4.2.5.15.4 Determinación de elementos químicos perjudiciales

La determinación cuantitativa de ciertos elementos químicos como arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), selenio (Se), vanadio (V) y zinc (Zn) se ha llevado a cabo siguiendo la norma [UNE-EN ISO 11885](#). El equipo usado es el espectrómetro Optima 2100 DV de la compañía PerkinElmer (Figura 59). Este equipo utiliza la Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES).

Antes de analizar el eluato se lleva a cabo la calibración del equipo, utilizando muestras cuya concentración química es conocida.

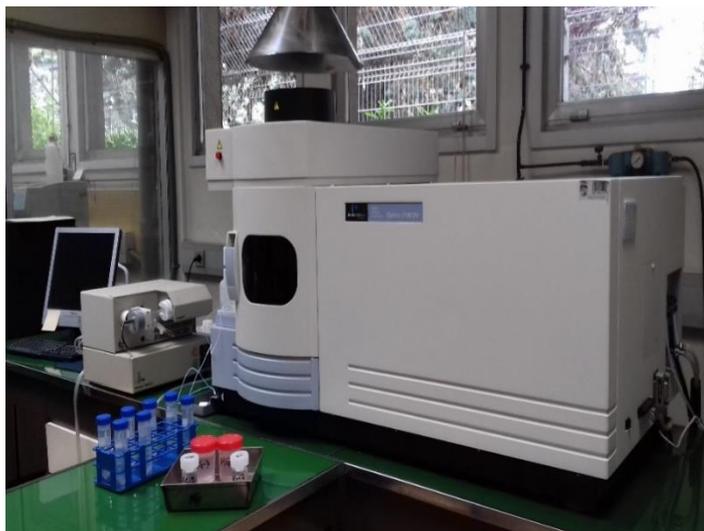


Figura 59. Espectrómetro de emisión óptica con plasma de acoplamiento inductivo.

Para la determinación cuantitativa del mercurio (Hg) presente en el eluato se ha seguido la norma [UNE-EN ISO 12846](#). El equipo empleado (Figura 60) es el analizador de mercurio Nippon RA-3 de la casa VERTEX. Este equipo utiliza la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica con Vapor Frío (CVAAS).

Antes de analizar el eluato se realiza la calibración del espectrómetro, utilizando muestras cuya concentración química es conocida.



Figura 60. Analizador de mercurio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez finalizado el desarrollo experimental del equipo MCT y del mortero geotérmico MG 7, se procede al análisis de los resultados obtenidos.

De este modo, a partir de los valores de conductividad térmica obtenidos durante la validación del equipo MCT se determina cuál es el tamaño mínimo de las muestras ensayadas, así como la intensidad eléctrica apropiada en cada ensayo. Además, se obtiene la influencia que produce la realización de una ranura rellena de pasta térmica o polvo del mismo material. También se obtienen las desviaciones de los valores obtenidos con el equipo MCT, al compararlos con los medidos en un equipo comercial, así como la corrección de calibración del equipo de medida y la estimación de su incertidumbre.

Por otro lado, se muestran los resultados de todos los ensayos llevados a cabo para desarrollar el mortero geotérmico MG 7 y se comparan estos valores con los de la normativa de referencia y con los de otros morteros geotérmicos, tanto comerciales como desarrollados por otros grupos de investigación.

Todo esto permitirá extraer unas conclusiones que serán expuestas en el próximo capítulo.

5.1 Desarrollo del equipo de medida de la conductividad térmica

Aunque en esta tesis, el equipo MCT se ha utilizado para medir la conductividad térmica de diversos rellenos geotérmicos, puede utilizarse también para medir otros materiales, como rocas, suelos, áridos o refractarios, siempre que no sean conductores de la corriente eléctrica, ya que si el hilo de calentamiento y el termopar se ponen en contacto a través de un conductor eléctrico los valores de temperatura obtenidos son ambiguos. Esto, lógicamente, conduciría a una medida errónea de la conductividad térmica.

Se muestra el procedimiento de cálculo de la conductividad térmica tomando como ejemplo un ensayo realizado sobre la muestra-patrón Skamol SM-65.

En la Figura 61 pueden verse las tres curvas obtenidas durante el ensayo, correspondientes al Sensor 1 (termopar del elemento de medición), al Sensor 2 (termopar que registra la temperatura ambiente de la sala) y al Sensor 4 (termopar colocado sobre la cara superior de la muestra). La gráfica de las tres curvas está en escala lineal. Al representar la curva de calentamiento correspondiente al Sensor 1 se obtiene una integral exponencial.

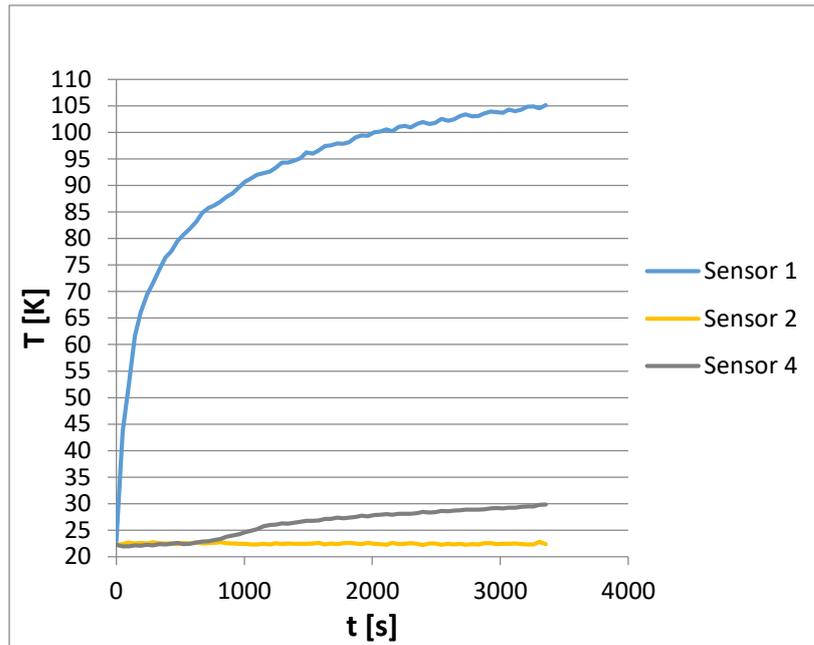


Figura 61. Gráfica temperatura-tiempo. Muestra Skamol SM-65.

Si se representa la curva de calentamiento del termopar del elemento de medición (Sensor 1) en escala semilogarítmica se obtiene la gráfica de la Figura 62.

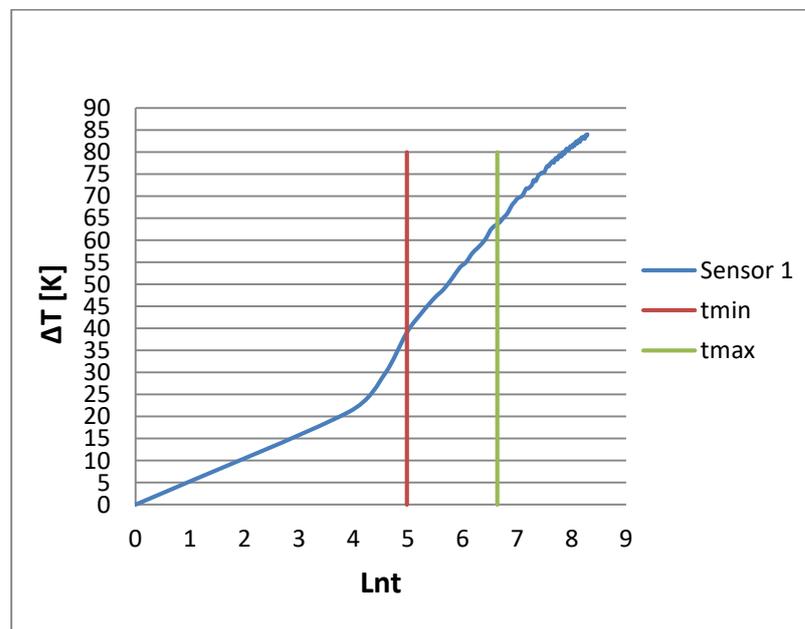


Figura 62. Curva de calentamiento en escala semilogarítmica. Muestra Skamol SM-65.

Analizando esta gráfica, junto con la evolución de las temperaturas del Sensor 4, se puede establecer una zona recta (entre t_{min} y t_{max}), cuya pendiente (Figura 63) permite obtener el valor de la conductividad térmica de la muestra.

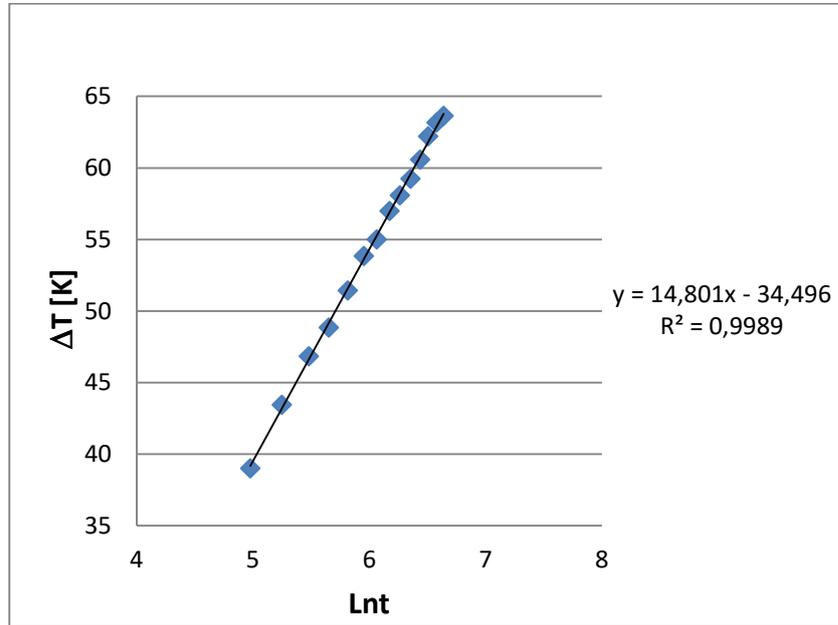


Figura 63. Recta de regresión. Muestra Skamol SM-65.

En la Figura 63 se observa que la pendiente de la recta de regresión es 14,801. En este ejemplo la intensidad eléctrica es de 1 A, la longitud del hilo de calentamiento es de 0,11 m y la diferencia de potencial es de 2,75 V. Al aplicar la expresión [34] se obtiene un valor de conductividad térmica de 0,13 W/m·K que, en este caso, coincide con el valor declarado por el fabricante de la muestra-patrón Skamol SM-65 (Tabla 10).

5.1.1 Tamaño mínimo de la muestra e intensidad eléctrica apropiada

La selección de la intensidad eléctrica y del tamaño mínimo de las muestras son parámetros fundamentales a la hora de realizar un ensayo de conductividad térmica con el equipo MCT.

A continuación, vamos a ver en dos gráficas la influencia que tienen estos dos parámetros.

En la Figura 64 se representan 4 curvas de calentamiento obtenidas al aplicar 4 intensidades eléctricas diferentes sobre la misma muestra (mismo material y mismo tamaño). Se trata de la muestra-patrón CN-90BA de tamaño mediano (180 mm x 70 mm x 50 mm).

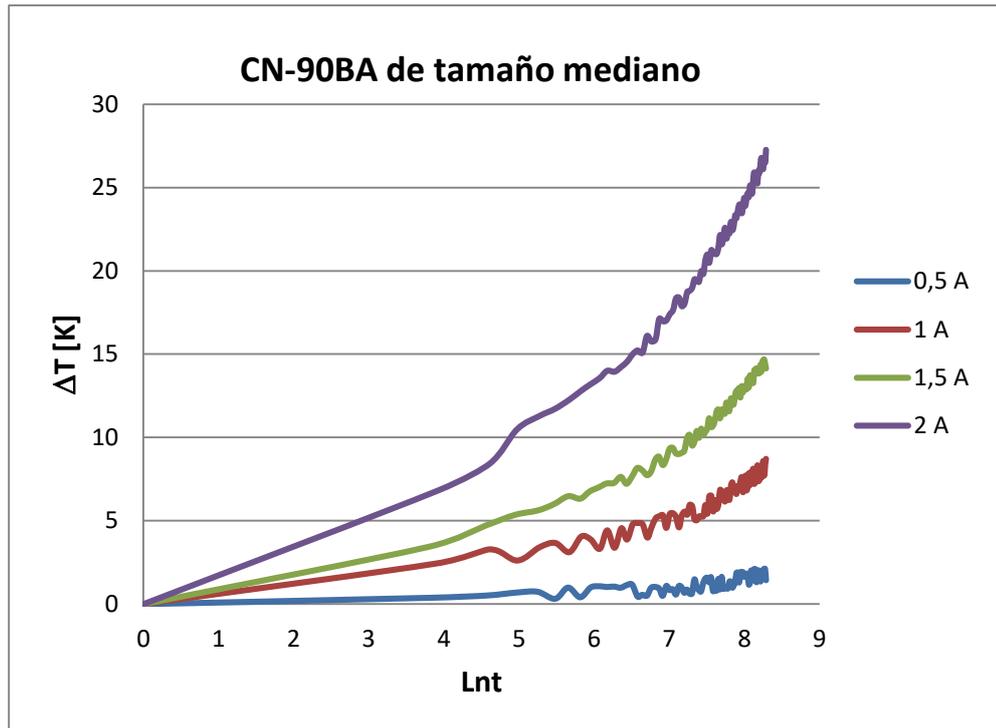


Figura 64. Influencia de la intensidad eléctrica al medir la conductividad térmica.

En esta gráfica puede verse que con una intensidad eléctrica de 0,5 A e incluso de 1 A es difícil discernir la zona recta de la curva de calentamiento, mientras que con 2 A e incluso con 1,5 A el “ruido” se reduce a niveles aceptables para poder establecer la zona recta de manera visual. Por tanto, puede apreciarse que una intensidad eléctrica adecuada es determinante a la hora de realizar los ensayos para la determinación de la conductividad térmica.

Esto está de acuerdo con [dos Santos y Gregório \(2004\)](#), pues según estos autores cuanto menor sea la potencia unitaria aplicada mayor será el nivel de “ruido” producido en la temperatura registrada.

Por otra parte, en la Figura 65 se representan 3 curvas de calentamiento obtenidas al aplicar la misma intensidad sobre 3 muestras del mismo tamaño, pero diferente conductividad térmica. Se utilizan las muestras-patrón Skamol SM-65, Macizo M5R y CN-90BA.

Las tres muestras son de tamaño pequeño (110 mm x 50 mm x 35 mm) y la intensidad eléctrica utilizada en los ensayos es de 1 A. En este caso, solo en la muestra de menor conductividad (Skamol SM-65) se puede establecer fácilmente la zona recta de la curva de calentamiento.

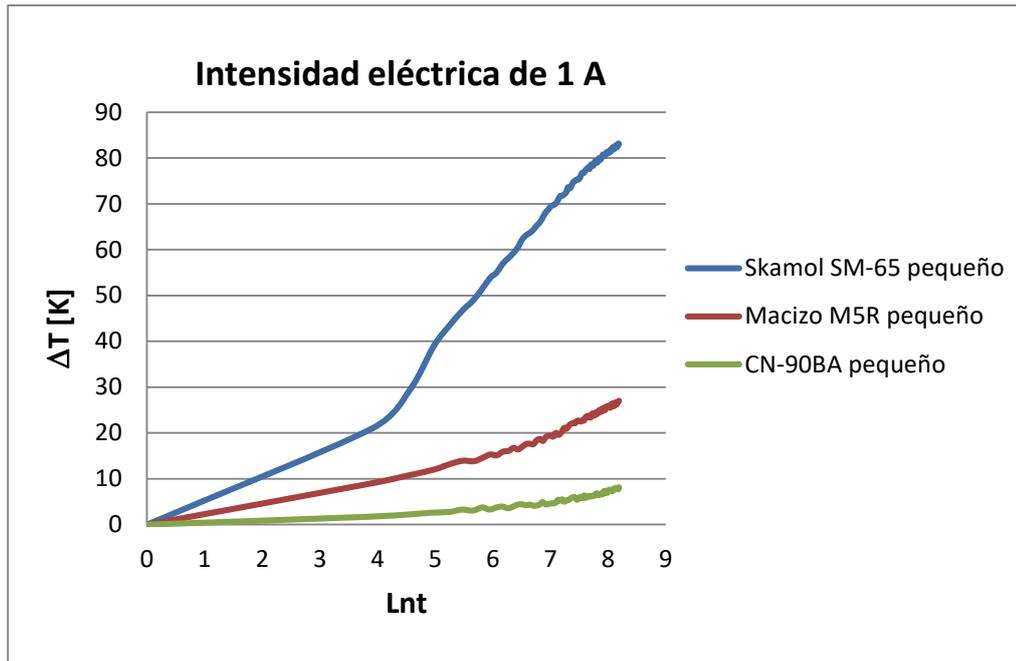


Figura 65. Variación de las curvas de calentamiento en función de la conductividad térmica.

Una vez vista la influencia que tienen, a la hora de medir la conductividad térmica, tanto el tamaño de la muestra como la intensidad eléctrica aplicada, se han realizado 32 ensayos para determinar, en función de la conductividad térmica, el tamaño mínimo de las muestras y la intensidad eléctrica apropiada.

De este modo, utilizando las 4 muestras-patrón se llevaron a cabo los ensayos empleando 4 intensidades eléctricas (0,5 A; 1 A; 1,5 A y 2 A) que, con el hilo de calentamiento utilizado en el equipo MCT, se corresponden a unas potencias térmicas por unidad de longitud de 6 W/m, 25 W/m, 56 W/m y 100 W/m, respectivamente.

En el ANEXO VI se incluyen las rectas de regresión con su coeficiente de determinación (R^2) y las conductividades térmicas obtenidas en los 32 ensayos realizados.

En la Tabla 40 pueden verse los 32 valores de conductividad térmica (λ_{exp}) obtenidos con el equipo MCT, aplicando diferentes intensidades eléctricas (y por lo tanto diferentes potencias por unidad de longitud) sobre las 4 muestras-patrón.

Tabla 40. Ensayos con el equipo MCT sobre las muestras-patrón.

Muestra-patrón			λ_{exp} [W/m·K]			
Nombre	λ_{ref} [W/m·K]	Tamaño [mm]	Intensidad eléctrica			
			Potencia por unidad de longitud			
			0,5 A 6 W/m	1 A 25 W/m	1,5 A 56 W/m	2 A 100 W/m
Skamol SM-65	0,13	110 x 50 x 35	0,13	0,13	<u>0,14</u>	<u>0,14</u>
		110 x 50 x 35	<i>0,75</i>	<u>0,68</u>	<u>0,67</u>	<u>0,67</u>
Macizo M5R	0,70	180 x 70 x 50	<i>0,64</i>	0,75	0,73	0,69
		240 x 120 x 60	<i>0,65</i>	0,66	0,70	0,65
MAXIAL 310	1,20	180 x 70 x 50	<i>0,90</i>	1,23	1,23	1,25
		110 x 50 x 35	<i>1,67</i>	<i>2,03</i>	<u>2,74</u>	<u>2,97</u>
CN-90BA	2,80	180 x 70 x 50	<i>3,91</i>	<i>2,05</i>	2,93	2,85
		240 x 120 x 60	<i>3,48</i>	<i>3,52</i>	2,97	2,76

Los resultados de conductividad térmica obtenidos se indican en cursiva, subrayado o negrita según los siguientes criterios. Los valores λ_{exp} en cursiva son aquellos que se desvían más del 10 % del valor de referencia (λ_{ref}) o que tienen un valor del coeficiente de determinación, R^2 , menor de 0,95. Los valores λ_{exp} subrayados son aquellos que se desvían menor del 10 % y el valor de R^2 es mayor o igual a 0,95, pero la ventana de tiempos es tan pequeña que el ajuste se lleva a cabo con menos de 10 valores. Los valores λ_{exp} en negrita son aquellos que se desvían menor del 10 %, el valor de R^2 es mayor o igual a 0,95 y el ajuste se lleva a cabo con al menos 10 valores.

Solo se consideran adecuados los valores en negrita.

Después de analizar la Tabla 40 y en base a los criterios establecidos se puede determinar, en función de la conductividad térmica de la muestra, el tamaño mínimo de la muestra a ensayar y la intensidad eléctrica apropiada a aplicar en el equipo MCT.

Así, según se indica en la Tabla 41, si la conductividad térmica es menor de 0,70 W/m·K el tamaño mínimo de la muestra es 110 mm x 50 mm x 35 mm y se considera apropiada tanto la intensidad eléctrica de 0,5 A como la de 1 A. Cuando la conductividad térmica es mayor o igual de 0,70 W/m·K dicho tamaño mínimo es de 180 mm x 70 mm x 50 mm, en cuyo caso si la conductividad térmica está comprendida entre 0,70 y 1,20 W/m·K se considera apropiada

tanto la intensidad eléctrica de 1 A, como la de 1,5 A como la de 2 A y si es mayor de 1,20 W/m·K se considera apropiada tanto la intensidad eléctrica de 1,5 A como la de 2 A.

Tabla 41. Tamaño mínimo de la muestra e Intensidad eléctrica apropiada en el equipo MCT.

λ [W/m·K]	Tamaño mínimo de la muestra [mm]
< 0,70	110 x 50 x 35
\geq 0,70	180 x 70 x 50
λ [W/m·K]	Intensidad eléctrica apropiada [A]
< 0,70	0,5 / 1
0,70 – 1,20	1 / 1,5 / 2
> 1,20	1,5 / 2

5.1.2 Influencia producida por la ranura y el relleno de la misma

Se realizan 6 ensayos para estudiar la influencia producida por la ranura y el relleno de esta. Los ensayos se realizan en la muestra-patrón Macizo M5R (con 0,70 W/m·K de conductividad térmica). Conforme a la Tabla 41 se ha seleccionado el tamaño de muestra 180 mm x 70 mm x 50 mm y se han aplicado las tres intensidades eléctricas apropiadas (1 A; 1,5 A y 2 A). A esta muestra-patrón se le ha realizado una ranura que posteriormente se rellena con pasta térmica y polvo de la propia muestra.

En el ANEXO VI se incluyen las rectas de regresión con su coeficiente de determinación (R^2) y las conductividades térmicas obtenidas en los 6 ensayos realizados.

En la Tabla 42 pueden verse los 6 valores de conductividad térmica (λ_{exp}) obtenidos con el equipo MCT sobre la muestra-patrón Macizo M5R usando relleno en la ranura.

Tabla 42. Ensayos con el equipo MCT sobre la muestra-patrón Macizo M5R usando relleno.

Muestra-patrón				λ_{exp} [W/m·K]		
Nombre	λ_{ref} [W/m·K]	Tamaño [mm]	Relleno	Intensidad eléctrica		
				Potencia por unidad de longitud 1 A 25 W/m	1,5 A 56 W/m	2 A 100 W/m
Macizo M5R	0,70	180 x 70 x 50	Pasta térmica	0,70	0,68	0,69
			Polvo	0,64	0,67	0,84

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 42 se puede concluir que no es necesario realizar una ranura en las muestras, pues rellenando la misma, con pasta térmica o polvo de la

propia muestra, el resultado obtenido no mejora. De hecho, al medir con la intensidad eléctrica de 2 A y utilizar polvo de la propia muestra, el resultado obtenido empeora significativamente con respecto al valor obtenido sin realizar la ranura (Tabla 40).

5.1.3 Comparativa de los valores de conductividad térmica de las muestras

En la Tabla 43 se indican las conductividades térmicas de las muestras de relleno geotérmico de uso común. Los valores mostrados son el promedio de tres ensayos y se han obtenido con el equipo comercial Shotherm QTM-F1 y con el equipo MCT.

Tabla 43. Medidas de conductividad térmica y desviaciones obtenidas.

Muestra	$\lambda_{\text{Literatura}}$ [W/m·K]	$\lambda_{\text{QTM-F1}}$ [W/m·K]	λ_{MTC} [W/m·K]	λ_{MTC}	
				desviación a $\lambda_{\text{Literatura}}$	desviación a $\lambda_{\text{QTM-F1}}$
M 01	0,70	0,71	0,70	0 %	-1 %
M 02	0,80	0,79	0,82	+3 %	+4 %
M 03	1,53	1,63	1,58	+3 %	-3 %
M 04	0,80	0,84	0,81	+1 %	-4 %

Por su parte, los valores bibliográficos se han obtenido de [Hellström \(2011\)](#), [Creus Solé \(2008\)](#) y [Allan \(1997\)](#).

Puede observarse que los valores medidos con el equipo MCT son muy parecidos a los valores reportados en la literatura, obteniéndose una desviación máxima de 3 % en las muestras M 02 y M 03. También son muy parecidos a los valores medidos con el equipo comercial Shotherm QTM-F1, obteniéndose una desviación máxima del 4 % en las muestras M 02 y M 04.

5.1.4 Calibración del equipo MCT. Estimación de la incertidumbre de medida

Para la calibración del equipo MTC se utilizaron 4 muestras-patrón. Para ello se realizaron, en condiciones de repetibilidad, 10 medidas de conductividad térmica sobre 4 puntos de control (0,13/0,70/1,20/2,80).

Se ha hecho estimación tipo A y tipo B. Según la [EA-4/02 \(2013\)](#), una estimación tipo A en una calibración se pueda considerar fiable cuando el número de medidas repetidas sea igual o mayor a 10.

En la Tabla 44 se indican los valores medidos z_i , así como el valor nominal y la incertidumbre que figuran en los certificados de calibración de las muestras-patrón.

Previamente a la realización de las medidas, se hicieron unas marcas en ambos ladrillos de cada muestra con el objeto de garantizar que en todos los ensayos estos estuviesen colocados en la misma posición.

Tabla 44. Calibración del equipo MCT. Muestras-patrón y valores medidos.

Conductividad térmica [W/m·K]				
Muestras-patrón			Equipo MCT	
Nombre	Certificado de calibración		z_i : valores medidos	
	Valor nominal	U_{cer} (K= 2)		
Skamol SM-65	0,13	0,00	0,13	0,14
			0,12	0,13
			0,14	0,14
			0,13	0,13
			0,13	0,14
Macizo M5R	0,70	0,01	0,71	0,73
			0,74	0,72
			0,65	0,68
			0,73	0,69
			0,77	0,73
MAXIAL 310	1,20	0,02	1,24	1,22
			1,18	1,26
			1,19	1,29
			1,26	1,23
			1,25	1,26
CN-90BA	2,80	0,04	2,73	2,94
			2,83	2,86
			2,92	2,89
			2,91	2,98
			2,77	2,87

A los 10 valores medidos en cada muestra-patrón se les aplica el criterio de rechazo de Chauvenet para asegurar que no hay valores atípicos (outliers). Posteriormente, se les hace el test de normalidad de Shapiro-Wilk para comprobar que, con un 95 % de probabilidad, las medidas obtenidas en los ensayos siguen una distribución normal.

En la Tabla 45 se indica el valor medio \bar{z} de los 10 ensayos, la desviación típica s_c , la corrección de calibración C , la precisión relativa y la exactitud relativa. Como puede observarse el equipo MCT presenta un error sistemático máximo de 0,07 W/m·K (muestra-patrón CN-90BA). También puede verse que, en todo el rango del equipo, la precisión relativa, expresada mediante la %RSD (desviación típica relativa), tiene un valor máximo del 5 %, mientras que el valor máximo de la exactitud relativa es del 3 %.

Se establece el criterio de considerar estos valores máximos como los valores de precisión relativa y exactitud relativa del equipo.

Tabla 45. Calibración del equipo MCT. Resultados.

Muestras-patrón	Equipo MCT				
	[W/m·K]			(%)	
	\bar{z}	s_c	C	Precisión relativa	Exactitud relativa
Skamol SM-65	0,13	0,007	0,00	5	0
Macizo M5R	0,72	0,034	-0,02	5	3
MAXIAL 310	1,24	0,034	-0,04	3	3
CN-90BA	2,87	0,077	-0,07	3	3

Representando en un gráfico los valores de la corrección de calibración C de la Tabla 45 se obtiene la Figura 66, la cual permite conocer la corrección que debe aplicarse a las medidas de conductividad térmica obtenidas con el equipo MCT. Puede observarse que la corrección de calibración sigue una relación prácticamente lineal con la conductividad térmica, siendo mayor la corrección de calibración cuanto mayor es la conductividad térmica.

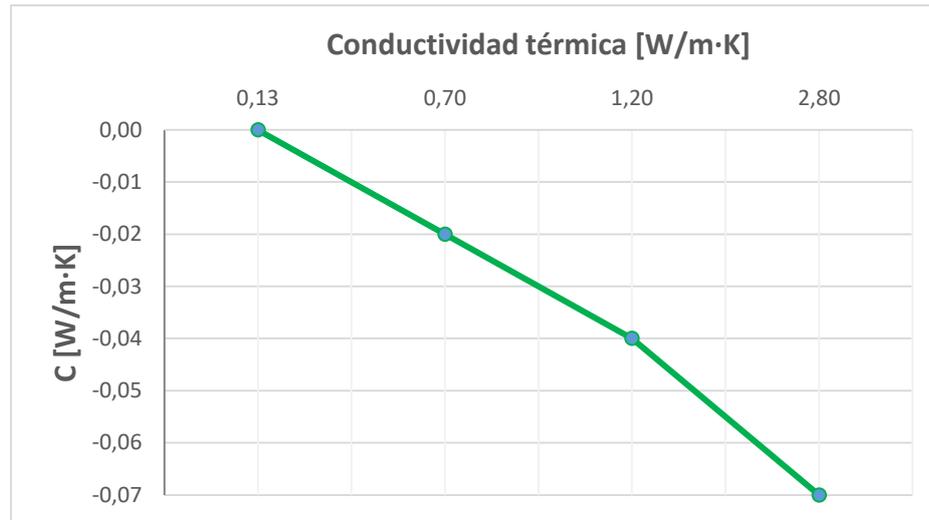


Figura 66. Gráfico para obtener la corrección de calibración en el equipo MCT.

A partir de los valores U_{cer} y s_c de la Tabla 44 y de la Tabla 45, respectivamente, se ha elaborado el gráfico de la Figura 67 en el que se puede obtener la incertidumbre expandida U_M (para un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %) que tendrá una muestra ensayada con el equipo MCT, según sea la conductividad térmica de esta y el número de ensayos n realizados para su determinación. Para obtener el citado gráfico se han utilizado la expresiones [58] y [59] del ANEXO VII.

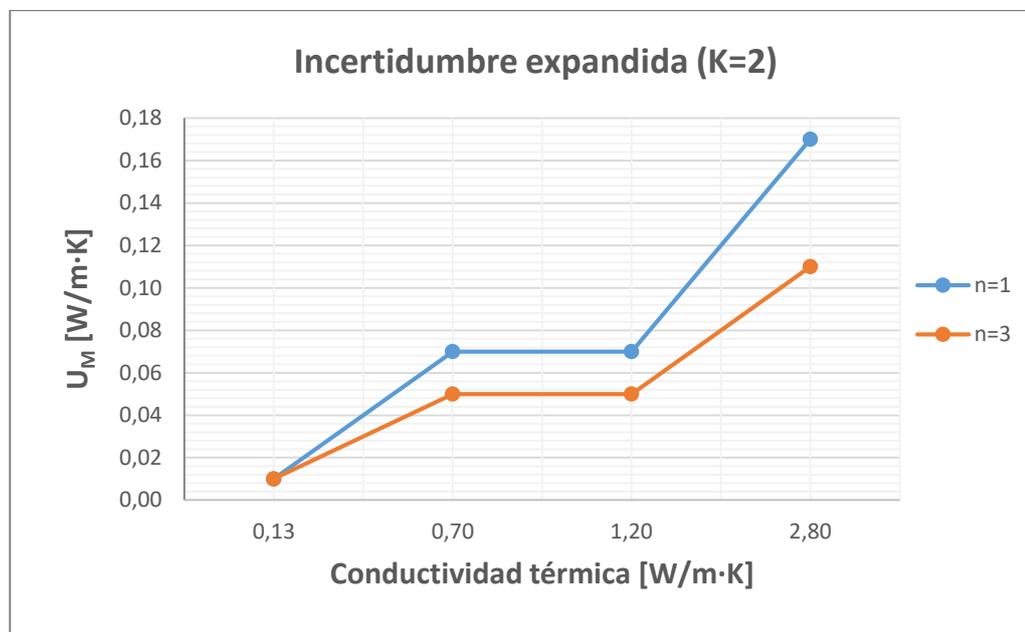


Figura 67. Gráfico para obtener la incertidumbre expandida con el equipo MCT.

Puede verse que la incertidumbre expandida se mantiene constante en el rango 0,70-1,20 W/m·K, con un valor de 0,07 W/m·K cuando se realiza una sola medida o de 0,05 W/m·K si se obtiene la conductividad térmica como promedio de tres medidas.

5.1.5 Resumen de las especificaciones técnicas del equipo MCT

Como resultado final del presente trabajo de investigación, se ha desarrollado un equipo de medida de la conductividad térmica.

En la Tabla 46 se resumen las principales especificaciones técnicas del equipo desarrollado.

Tabla 46. Especificaciones técnicas del equipo MCT.

Método de medida de la conductividad térmica	THW
Rango de medida de la conductividad térmica	0,13-2,80 W/m·K
Tamaño mínimo de las muestras	(110 x 50 x 35) mm ³ ($\leq 0,70$ W/m·K) (180 x 70 x 50) mm ³ ($> 0,70$ W/m·K)
Material a ensayar	Sólidos dieléctricos
Exactitud relativa	3 %
Precisión relativa	5 %
Duración del ensayo	< 15 min
Alimentación	CA de 230 V a 50 Hz
Material del hilo de calentamiento	Nicromo
Longitud del hilo de calentamiento	Variable: (0-510) mm
Diámetro del hilo de calentamiento	0,2 mm
Amperaje de la fuente de alimentación	(0-3) A
Sensores de temperatura	Termopar tipo K
Diámetro de los sensores de temperatura	0,1 mm
Distancia hilo de calentamiento-sensor de temperatura	1 mm
Almacenamiento de datos	Tarjeta de memoria microSD
Dimensiones	600 mm x 500 mm x 260 mm
Peso	10 kg
Condiciones ambientales	(0-45) °C y (30-80) % H.R.

Cabe destacar que el equipo MCT puede ser utilizado para medir la conductividad térmica de materiales sólidos dieléctricos, tanto disgregados como conformados. Además, aunque ha sido especialmente concebido para el ensayo de rellenos geotérmicos, puede utilizarse con áridos, hormigones, suelos, rocas, refractarios, detritus de perforación o testigos de sondeos.

5.2 Desarrollo del mortero geotérmico

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados para la caracterización del mortero geotérmico MG 7.

5.2.1 Análisis granulométrico

Como se observa en la Figura 68, la granulometría de los áridos del mortero MG 7 es continua y el contenido en finos (< 0,063 mm) alcanza un valor próximo al 21 %.

Puede verse que la curva granulométrica se ajusta bastante bien a la curva de Fuller. Esta curva de referencia es una parábola y representa, para un tamaño máximo de árido, la granulometría óptima, es decir, aquella cuya compactación es máxima ([Bustillo Revuelta, 2008](#)).

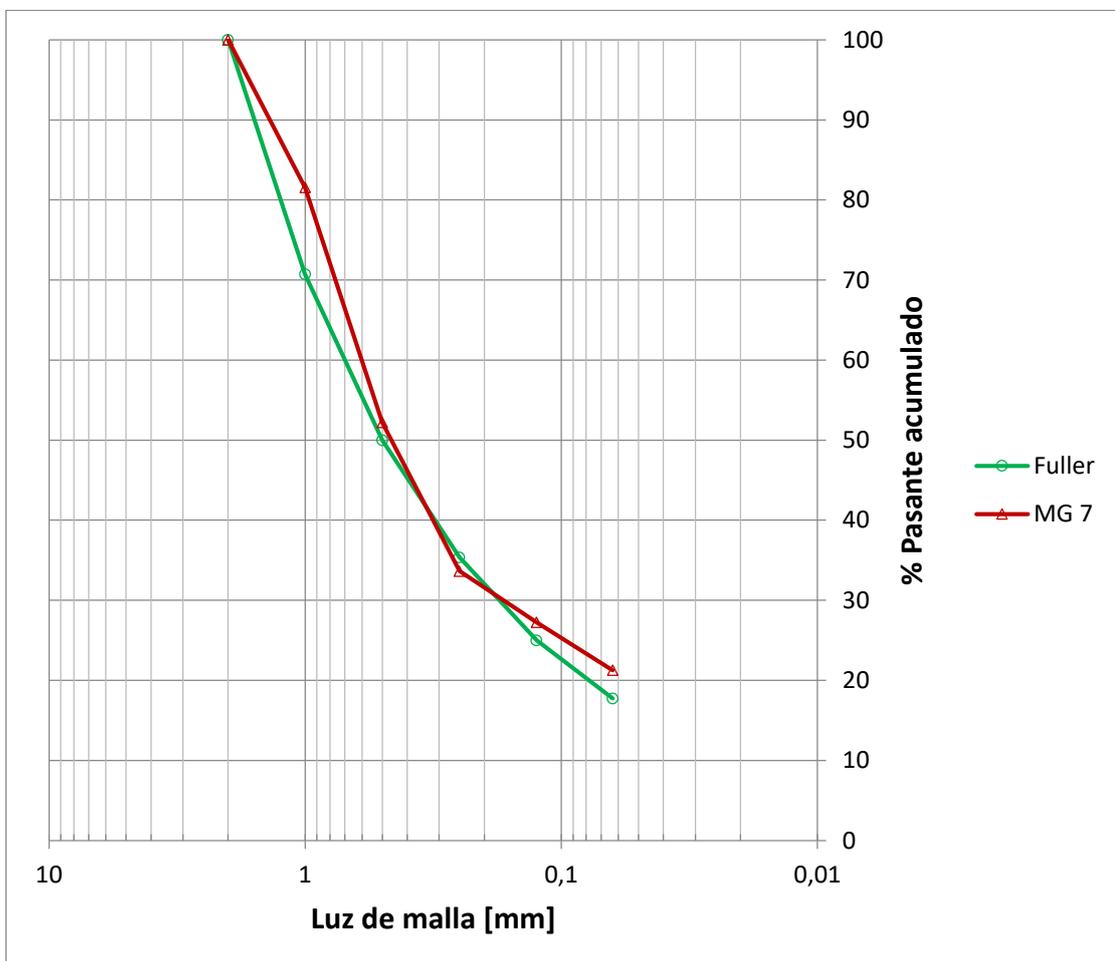


Figura 68. Curva granulométrica del mortero MG 7 y parábola de Fuller para 2 mm.

5.2.2 Determinación de la consistencia

Se ha obtenido un valor del escurrimiento de 255 mm que, según la norma [UNE-EN 1015-6](#), corresponde a una consistencia fluida (> 200 mm).

5.2.3 Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo de principio de fraguado del mortero MG 7 ha sido de 230 minutos (3 horas y 50 minutos). El tiempo de final de fraguado ha sido de 270 minutos (4 horas y 30 minutos). La temperatura de la sala durante la realización del ensayo fue de 20 °C.

Vemos que se dispone de más de 3 horas para realizar la puesta en obra del mortero y que en menos de 5 horas ya está totalmente fraguado.

5.2.4 Determinación de la exudación

En la Tabla 47 se muestran los resultados del ensayo de exudación del mortero MG 7, donde la exudación se expresa en tanto por ciento. La temperatura de la sala durante la realización del ensayo ha sido de 25 °C.

Tabla 47. Valores porcentuales de exudación del mortero MG 7.

Tiempo [min]	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Exudación (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,4

La exudación del mortero MG 7 al final del ensayo (3 horas) es del 0,4 %.

Este valor es muy inferior a los valores máximos recogidos en la [DGC \(2005\)](#), donde se establece que la exudación de la lechada será a las 2 h ≤ 3 %, o en el [PG-3 \(1976\)](#), donde se determina que la exudación de la lechada deberá ser ≤ 2 % a las 3 h.

5.2.5 Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta

Se ha obtenido un valor de la densidad aparente del mortero fresco de 2.110 kg/m³.

Este valor debe de ser mayor que la densidad del fluido de perforación, que suele tener una densidad de 1.050 kg/m³.

Para obtener el valor de la densidad aparente y de la porosidad abierta del mortero endurecido se han hecho las siguientes pesadas (Tabla 48).

Tabla 48. Valores del mortero MG 7 medidos en la balanza de precisión.

P1 (probeta seca)	519,1 g	518,1 g
P2 (probeta húmeda)	560,6 g	561,2 g
P3 (probeta sumergida)	307,2 g	308,1 g

La densidad aparente ρ y la porosidad abierta n se calculan con las siguientes expresiones:

$$\rho = \frac{P_1}{P_2 - P_3} \cdot \rho_{agua} \quad [35]$$

$$n = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_3} \cdot 100 \quad [36]$$

El agua está a 15 °C y a esa temperatura tiene una densidad (ρ_{agua}) de 999,1 kg/m³.

El resultado final será el promedio de dos ensayos, uno con cada probeta. Así, el mortero endurecido tiene una densidad aparente ρ de 2.046 kg/m³, mientras que tiene una porosidad abierta n del 16,7 %.

A pesar de que el módulo de compresibilidad de los líquidos es muy elevado y, por tanto, se les suele considerar incompresibles, como el sondeo geotérmico tiene una gran longitud se producirá entonces un ligero aumento de la densidad con la profundidad. Por tanto, los valores de densidad en campo serán ligeramente mayores a los obtenidos en el laboratorio. Este aumento implica una disminución de la porosidad y consecuentemente un aumento de la conductividad térmica y la resistencia mecánica, así como una reducción de la permeabilidad.

5.2.6 Determinación de la resistencia a flexión y a compresión

El mortero debe soportar los esfuerzos a las que estará expuesto durante la vida útil para la que ha sido proyectada la instalación geotérmica, sin que se produzcan grietas, fisuras, etc. que perjudicarían la transferencia térmica y aumentarían la permeabilidad. La Tabla 49 muestra los valores promedio de resistencia a compresión y a flexión del mortero MG 7, obtenidos a los 7 y 28 días.

Tabla 49. Resultados de resistencia mecánica del mortero MG 7.

Resistencia a compresión [N/mm ²]		Resistencia a flexión [N/mm ²]	
7 días	28 días	7 días	28 días
41,9	47,3	5,3	6,1

El mortero geotérmico MG 7 tiene una elevada resistencia inicial, pues a los 7 días la resistencia a compresión y a flexión ya es, respectivamente, un 88,6 % y un 86,9 % de la resistencia a los 28 días.

El mortero MG 7 presenta un valor de resistencia a compresión a los 28 días de $47,3 \text{ N/mm}^2$, muy superior a los 15 N/mm^2 que es el valor mínimo de resistencia a compresión a los 28 días que marca la instrucción [EHE-08](#) para el hormigón no estructural.

5.2.7 Estudio de la homogeneidad

En la Figura 69 se ven las dos partes de la probeta cilíndrica seccionada.

De la observación visual de la probeta se aprecia una distribución uniforme de las partículas de árido, pues no presenta segregación ni anisotropía. Esto es gracias a la dosificación de los materiales, la distribución granulométrica de los áridos y el correcto amasado del mortero.



Figura 69. Vista general de la sección de la probeta cilíndrica.

La zona correspondiente al rectángulo rojo se muestra en la Figura 70. Como puede verse, la textura de la probeta del mortero geotérmico MG 7 es homogénea, aunque hay una pequeña coquera (cuadrado amarillo).

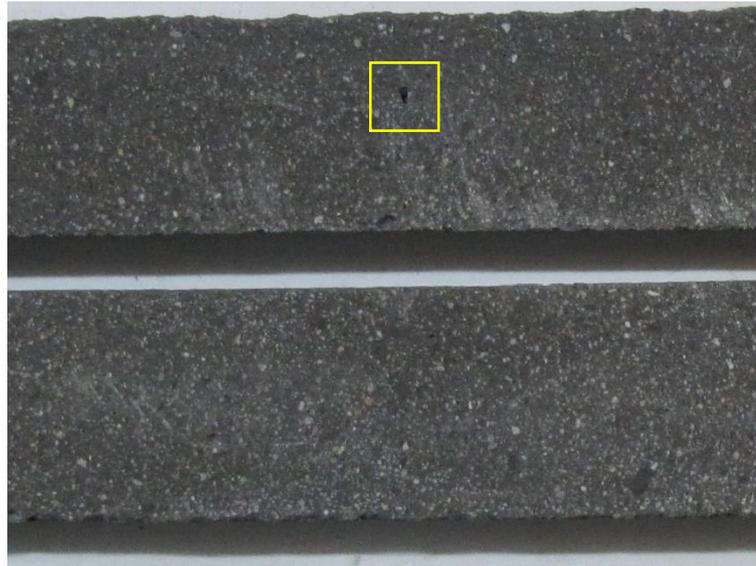


Figura 70. Vista de detalle de la sección de la probeta cilíndrica.

5.2.8 Determinación de la retracción

El comparador de longitud utilizado lleva un reloj comparador analógico con una resolución de 0,01 mm. Antes de cada serie de medidas se utilizó una barra metálica patrón con una longitud constante.

La toma de lecturas se ha realizado por triplicado, indicándose en el gráfico de la Figura 71 el resultado medio de las tres probetas, expresado en mm/m.

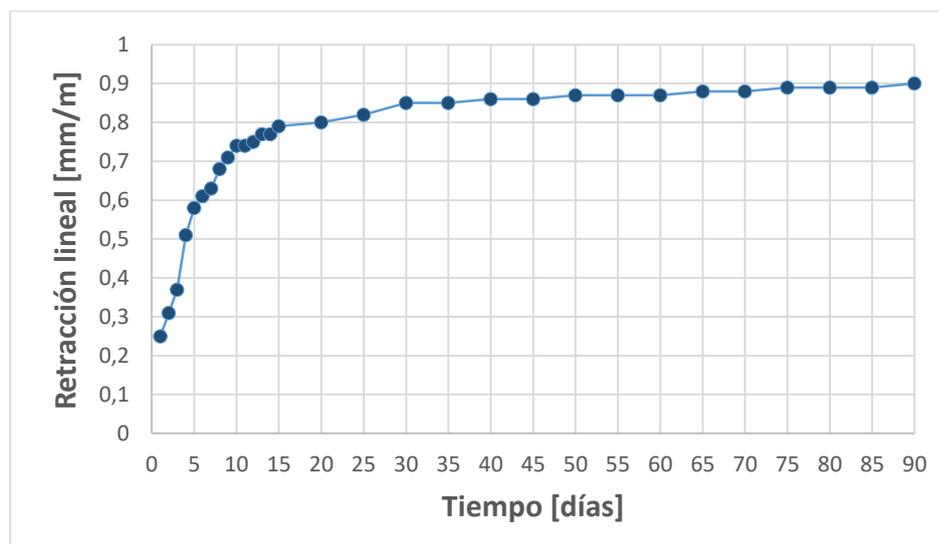


Figura 71. Resultados obtenidos durante el ensayo de retracción lineal del mortero MG 7.

Las primeras lecturas se han llevado a cabo el día 1, es decir, al día siguiente del amasado e inmediatamente después de sacar las probetas del molde. Según puede verse, la retracción lineal aumenta considerablemente durante los primeros 15 días y a partir de ese momento se mantiene prácticamente constante.

El mortero MG 7 tiene una retracción lineal a los 90 días de 0,9 mm/m.

5.2.9 Determinación del coeficiente de permeabilidad

La dificultad de las aguas subterráneas para penetrar y circular a través del mortero geotérmico mejora su durabilidad. Además, el carácter impermeable del mortero evita la modificación local del régimen hidrogeológico en acuíferos ubicados a distinta profundidad que podrían quedar conectados al ejecutar el sondeo geotérmico.

El ensayo de permeabilidad del mortero MG 7 se realiza con agua destilada y desaireada. Entre los extremos de la probeta se ha aplicado una diferencia de carga hidráulica constante de 300 kPa (3 bar). El ensayo se ha realizado dos veces y en ambos se ha obtenido un valor del coeficiente de permeabilidad del mortero MG 7 de $3,2 \cdot 10^{-11}$ m/s, para una temperatura del agua de 20 °C. La conductividad hidráulica resultante es la correspondiente a una arcilla media. Por tanto, se puede concluir que el mortero MG 7 es prácticamente impermeable.

[Eckhart \(1991\)](#) recomienda para los morteros geotérmicos un coeficiente de permeabilidad menor de 10^{-9} m/s. Este valor es coincidente con el que recomienda la [IGSHPA \(2016\)](#).

5.2.10 Determinación de la adherencia entre el mortero y la tubería

Durante la realización del ensayo en la prensa se han registrado los valores de carga vertical junto con los desplazamientos lineales del tubo coaxial de PEAD. El primer valor registrado corresponde a una carga de 0,267 kN y un desplazamiento de 0,1 mm.

Después de 43 minutos de ensayo, la carga vertical máxima que ha soportado el conjunto mortero-tubería ha sido de 5,028 kN, con un desplazamiento final del tubo coaxial de PEAD de 2,5 mm. Al dividir dicha carga entre el área lateral (superficie de contacto entre el mortero MG 7 y la tubería coaxial de PEAD) se obtiene una tensión tangencial máxima de 0,33 N/mm², que es la tensión tangencial admisible.

El coeficiente de dilatación térmica lineal del tubo de PEAD es mucho mayor que el del mortero MG 7 que se puede considerar despreciable y, por tanto, ambos tendrán una dilatación térmica diferencial que podría superar la resistencia a la cizalladura. Al calcular el esfuerzo térmico N del tubo de PEAD, como consecuencia de la dilatación térmica lineal del mismo y considerando comportamiento elástico, tendremos:

$$N = \alpha \cdot A \cdot E \cdot \Delta T \quad [37]$$

Donde el coeficiente de dilatación térmica α del tubo es de 0,22 mm/(m·°C), el módulo de Young E del tubo es de 1.100 MPa, la variación de temperatura máxima ΔT prevista en el tubo es de 30 °C y el área A del tubo es de 4,22 cm² (el tubo tiene un diámetro D de 40 mm y un espesor de 3,7 mm). Sustituyendo los valores en la ecuación [37] obtenemos un valor del esfuerzo térmico de 3.063,72 N.

La tensión tangencial térmica, en un sondeo de longitud H será:

$$\tau_{\text{térmico}} = \frac{N}{\pi \cdot D \cdot H} \quad [38]$$

Para un sondeo de 150 m de longitud tendremos una tensión tangencial de 0,000163 N/ mm².

Se puede observar que la tensión tangencial térmica es mucho menor que la tensión tangencial admisible (0,33 N/mm²). Por tanto, el mortero MG 7 endurecido soporta el esfuerzo térmico del tubo de PEAD e impide la dilatación térmica del mismo.

5.2.11 Estudio de la durabilidad

La durabilidad del mortero geotérmico es una característica muy importante para conseguir una adecuada funcionalidad a lo largo de la vida útil de la instalación. Si un mortero se fisura, agrieta, desmorona, etc. al someterse a ciclos de humedad-sequedad o hielo-deshielo reducirá su conductividad térmica y aumentará su conductividad hidráulica, con las consecuencias que esto supone.

En nuestro caso, después de realizar los ciclos de humedad-sequedad y hielo-deshielo no se aprecian grietas, fisuras, desmoronamiento ni descamación en las probetas del mortero MG 7.

La medida del peso se realizó por triplicado, indicándose en la Tabla 50 el valor medio de las tres pesadas. Tanto el peso inicial (antes de los 20 ciclos) como el peso final (después de los 20 ciclos) es el peso de las probetas secas.

Tabla 50. Peso seco al inicio y al final de los ensayos de durabilidad del mortero MG 7.

Ensayo de humedad-sequedad		Ensayo de hielo-deshielo	
Peso inicial	Peso final	Peso inicial	Peso final
518,1 g	502,3 g	514,3 g	503,7 g

La pérdida de peso producida al realizar los ensayos de humedad-sequedad y hielo-deshielo es, respectivamente, del 3,1 % y del 2,1 %.

En la Figura 72 se muestran los valores promedio de resistencia a compresión y a flexión de las probetas de referencia (no sometidas a ensayos de durabilidad) y de las probetas sometidas a los ensayos de hielo-deshielo (H-D) y humedad-sequedad (H-S).

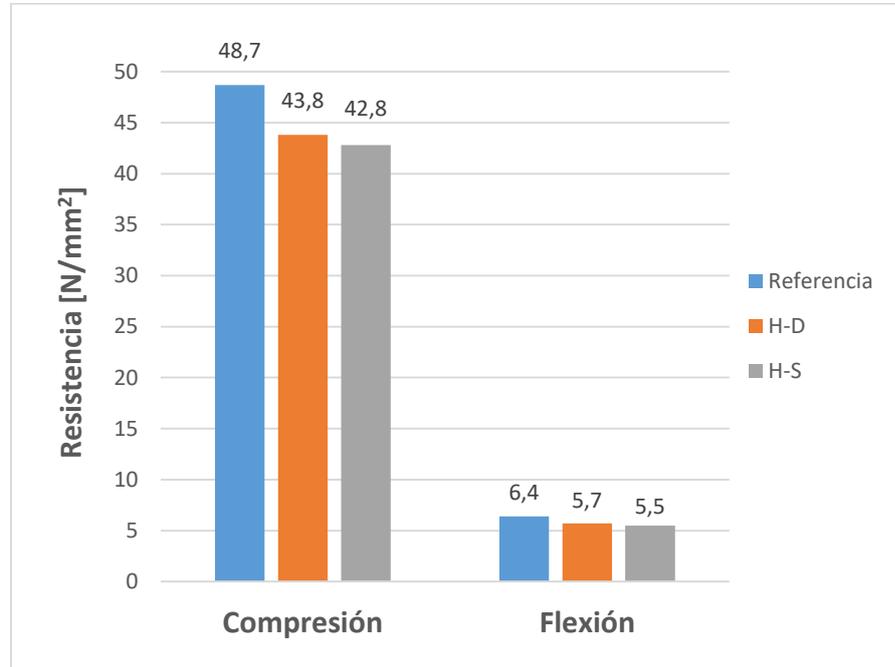


Figura 72. Comparativa de los resultados de resistencia mecánica del mortero MG 7.

Las probetas del mortero MG 7 sometidas a los ensayos de humedad-sequedad y de hielo-deshielo sufren, respectivamente, una pérdida de resistencia a compresión del 12,1 % y del 10,1 % respecto a las probetas de referencia, no sometidas a dichos ensayos. Igualmente, las probetas del mortero MG 7 sufren una pérdida de resistencia a flexión del 14,1 % con el ensayo de humedad-sequedad y del 10,9 % con el ensayo de hielo-deshielo.

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos en la pérdida de peso y las resistencias a compresión y a flexión, parece que el mortero MG 7 resiste ligeramente mejor los ciclos de hielo-deshielo que los de humedad-sequedad. De todas formas, los ensayos realizados han demostrado que el mortero geotérmico MG 7 tiene un adecuado comportamiento frente a los ciclos de humedad-sequedad y hielo-deshielo.

5.2.12 Análisis químico

Empleando la técnica XRF se ha obtenido la composición química (expresada en porcentaje de óxidos) de los elementos mayoritarios del mortero geotérmico MG 7, en % en peso de óxidos.

Los resultados del análisis se indican en la Tabla 51.

Tabla 51. Elementos mayoritarios del mortero geotérmico, en % en peso de óxidos.

Compuesto	Contenido (%)
SiO ₂	48,80
CaO	33,93
Al ₂ O ₃	3,93
Fe ₂ O ₃	2,89
MgO	1,89
K ₂ O	0,35
TiO ₂	0,24
Na ₂ O	0,23
MnO	0,07
LOI	7,23

LOI: pérdida por calcinación

El análisis de la composición química del mortero MG 7, revela que los dos elementos más abundantes son el silicio (Si) y el calcio (Ca). Esto parece razonable ya que los áridos utilizados están constituidos en gran parte por sílice y los principales productos de hidratación del cemento son los silicatos de calcio hidratados y el hidróxido de calcio.

Mediante la técnica FRX también se ha determinado la composición química de los elementos minoritarios y elementos traza del mortero geotérmico MG 7. Se ha aplicado un tiempo de medida de 180 s. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 52, en mg/kg.

Tabla 52. Elementos minoritarios y traza del mortero geotérmico, en mg/kg.

Elemento	Contenido [mg/kg]	Elemento	Contenido [mg/kg]
As	91,96	V	84,75
Ba	2.779,03	Zn	508,59
Cd	< LOD	Hg	< LOD
Co	< LOD	Zr	264,25
Cr	64,27	Sr	949,53
Cu	159,36	Rb	29,72
Mo	26,03	Sc	773,71
U	< LOD	Th	< LOD
Ni	128,25	Cs	51,30
Pb	183,06	Te	38,95
Sb	35,13	Sn	34,15
Se	< LOD	S	4.875,80

LOD: límite de detección

Puede verse que los elementos minoritarios más abundantes en el mortero son azufre (S) y bario (Ba), ambos proceden de la barita (sulfato de bario) que tienen las colas de lavadero (es uno de los minerales de la ganga). Además, el azufre (S) también está presente en el yeso que se incorpora al cemento durante su fabricación.

Destacar el elevado contenido de algunos metales pesados (Cu, Ni, Sc, Pb, Zn, Zr, Sr). Estos son aportados principalmente por la escoria blanca y las cenizas volantes.

Sin embargo, otros metales pesados (Cd, Co, Hg) aparecen en el análisis químico del mortero MG 7 con muy baja concentración. Esto puede ser debido a la limitada resolución de la técnica empleada.

5.2.13 Análisis mineralógico

La determinación de la composición mineralógica semicuantitativa del mortero endurecido MG 7 se ha realizado mediante la técnica XRD. La tensión es de 45 kV y la intensidad del tubo generador de rayos X se ha ajustado en todas las medidas a 40 mA. El tamaño de paso es de 0,02°, el tiempo de paso es 10 s y se ha registrado el difractograma en el intervalo 2θ entre 5° y 80°.

La identificación de fases se ha realizado con el software X'Pert HighScore. Se ha utilizado como fichero de referencia el archivo del JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Los productos hidratados del cemento Portland están fundamentalmente constituidos por un conjunto de fases cristalinas, (principalmente portlandita, etringita y monosulfoaluminato), por compuestos de cemento anhidro (principalmente alita y belita) y sobre todo por un silicato cálcico hidratado, de naturaleza cuasi-amorfa, que se denominada gel C-S-H ([Martínez Ramírez y Blanco Varela, 2008](#)).

Las principales fases cristalinas del mortero MG 7 a los 28 días de edad y su abundancia relativa se indican en la Tabla 53.

Tabla 53. Fases cristalinas del mortero MG 7 a los 28 días.

Fase cristalina	Fórmula química	Abundancia relativa
Cuarzo	SiO ₂	*****
Portlandita	Ca(OH) ₂	*
Calcita	CaCO ₃	*
Alita (silicato tricálcico)	Ca ₃ SiO ₅	*

Era esperable que la fase cristalina más abundante presente en el mortero MG 7 sea el cuarzo, SiO₂, pues es el principal mineral de la arena silíceo y de las colas de lavadero (estos dos áridos suponen el 80 % del total).

La portlandita se forma como consecuencia de las reacciones de hidratación del cemento. Es el segundo producto de hidratación más importante del cemento, constituye un 20-25 % del volumen total del cemento hidratado. La calcita proviene principalmente de las colas de lavadero (es uno de los minerales de la ganga) y de la caliza que el cemento CEM I incorpora como relleno, en una proporción máxima del 5 %. También puede provenir de la carbonatación que sufre la portlandita al reaccionar con el dióxido de carbono del aire. La alita es el componente principal del clinker de cemento Portland. Por tanto, su presencia en el mortero endurecido es consecuencia de la falta de hidratación total del mismo, debido a que a la edad de 28 días la cinética de los procesos de hidratación hace que aún no se haya completado.

La lista de picos de difracción del mortero MG 7 se puede ver en la Tabla 54, donde se indica la posición, altura, anchura total a media altura (FWHM), distancia interplanar e intensidad relativa.

Tabla 54. Lista de picos de difracción del mortero MG 7.

Pos. [°2Theta]	Alt. [cts]	FWHM [°2Theta]	Dist. Inter. [Å]	Int. Rel. [%]
9,1583	28,85	0,4015	9,65653	0,42
12,0917	33,03	0,2007	7,31965	0,48
15,7994	60,63	0,2007	5,60929	0,88
18,0327	292,09	0,1338	4,91933	4,24
20,8596	1.156,68	0,1171	4,25860	16,78
21,8060	33,53	0,4015	4,07586	0,49
23,0482	134,74	0,1673	3,85893	1,95
24,3192	33,62	0,1004	3,66005	0,49
26,6419	6.892,94	0,1171	3,34600	100,00
28,7528	107,64	0,2007	3,10498	1,56
29,4274	1.167,53	0,1338	3,03531	16,94
30,0642	111,00	0,1338	2,97246	1,61
31,4495	63,57	0,2007	2,84461	0,92
32,2452	307,21	0,1338	2,77621	4,46
32,5987	570,79	0,0836	2,74691	8,28
34,0896	457,37	0,1338	2,63011	6,64
34,3863	357,91	0,0669	2,60809	5,19
35,1567	30,53	0,3346	2,55269	0,44
35,9724	69,57	0,2007	2,49665	1,01
36,5411	639,94	0,0669	2,45909	9,28

Pos. [°2Theta]	Alt. [cts]	FWHM [°2Theta]	Dist. Inter. [Å]	Int. Rel. [%]
38,7616	73,06	0,1338	2,32318	1,06
39,4567	671,46	0,0669	2,28384	9,74
40,2872	203,86	0,0669	2,23866	2,96
41,3157	199,18	0,0502	2,18528	2,89
42,4434	282,86	0,0836	2,12979	4,10
42,8707	510,33	0,0816	2,10780	7,40
42,9918	307,22	0,0612	2,10737	4,46
44,0405	33,46	0,4896	2,05449	0,49
45,7837	300,25	0,0612	1,98024	4,36
45,8855	186,84	0,0816	1,97608	2,71
47,1084	281,18	0,3264	1,92760	4,08
47,5660	218,86	0,2448	1,91012	3,18
48,5337	100,39	0,2040	1,87427	1,46
50,1314	923,55	0,1020	1,81821	13,40
50,2717	497,63	0,0612	1,81797	7,22
50,7516	125,10	0,1632	1,79744	1,81
51,7412	148,51	0,1020	1,76536	2,15
54,3800	42,82	0,2448	1,68577	0,62
54,8634	206,76	0,1020	1,67205	3,00
55,0039	132,02	0,1020	1,67226	1,92
55,3225	88,00	0,1224	1,65926	1,28
56,1660	142,47	0,0816	1,63632	2,07
56,5884	80,92	0,2448	1,62511	1,17
57,3415	40,25	0,4080	1,60554	0,58
58,5620	28,04	0,2448	1,57495	0,41
59,9563	488,16	0,1224	1,54162	7,08
60,0903	306,35	0,0816	1,54232	4,44
62,2505	91,77	0,1224	1,49020	1,33
64,0368	114,23	0,0816	1,45287	1,66
65,7739	35,04	0,4080	1,41864	0,51
67,7275	252,17	0,1020	1,38240	3,66
68,1454	274,57	0,1020	1,37493	3,98
68,3093	349,32	0,0816	1,37203	5,07
73,4612	148,75	0,1020	1,28801	2,16
75,6427	154,75	0,1632	1,25619	2,24
75,9149	68,14	0,1224	1,25548	0,99
77,6530	105,81	0,0816	1,22862	1,54
79,8723	159,66	0,0612	1,19997	2,32

En la Figura 73 se muestra el difractograma del mortero MG 7 obtenido con radiación Cu K α .

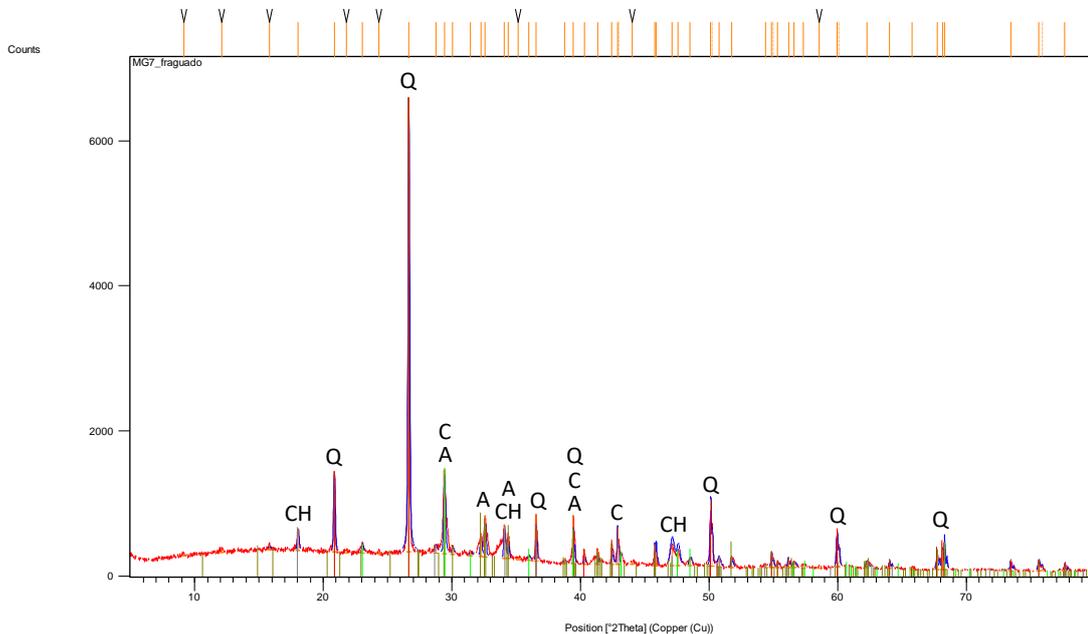


Figura 73. Difractograma del mortero MG 7 (CH: portlandita, Q: cuarzo, A: alita, C: calcita).

Además de las fases cristalinas presentes, el difractograma obtenido pone de manifiesto que existe un cierto contenido de fase vítrea (fondo del difractograma) ya que el difractograma presenta una banda difusa para valores de 2θ comprendidos entre 10 y 35°.

5.2.14 Análisis microestructural y microanálisis composicional

Se ha utilizado la técnica SEM-EDX para obtener las micrografías y el análisis composicional de las muestras de mortero endurecido con una edad de 28 días.

Los principales compuestos que se forman durante la hidratación del cemento Portland son el gel C-S-H y la portlandita. El gel C-S-H es un silicato prácticamente vítreo, que representa 50-60 % del volumen total del cemento hidratado y que puede sufrir sustituciones isomórficas, admitiendo en su estructura cantidades considerables de otros iones, fundamentalmente Fe y Al ([Argiz Lucio, 2014](#)).

En la Figura 74 se muestra una imagen SEM (con electrones secundarios) del mortero MG 7 a 5.000 aumentos. En ella pueden verse los dos compuestos de hidratación más típicos del cemento Portland gris, pues se aprecia la morfología de partículas fibrosas de gel C-S-H (Silicato de Calcio Hidratado) y de cristales de portlandita (CH). Esta última presenta un buen desarrollo cristalino, con forma de placas hexagonales y los lados bien delimitados.

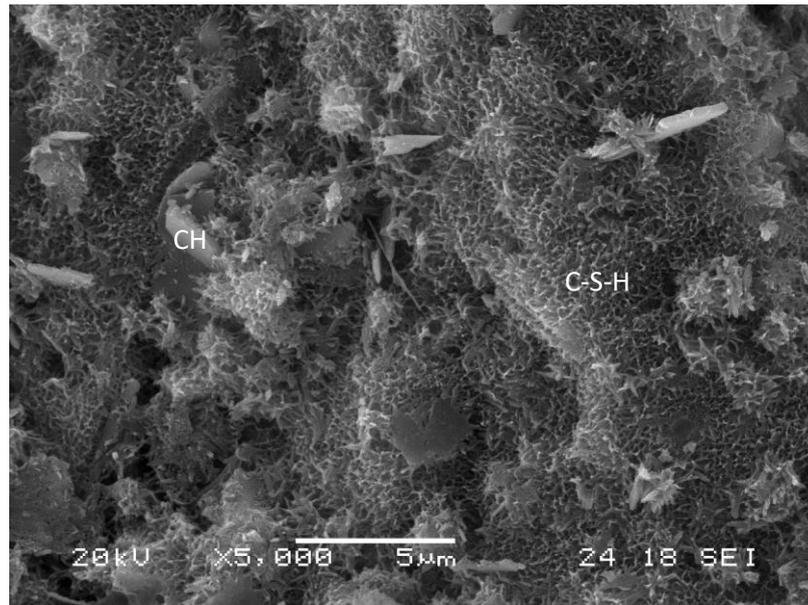


Figura 74. Micrografía del mortero MG 7 endurecido. Gel C-S-H y portlandita (CH).

En la imagen SEM (con electrones secundarios) de la Figura 75 se observa una matriz compacta, pero en el centro de la micrografía se puede identificar la morfología de una partícula de arena silícea que presenta una buena adherencia en la interfase pasta-árido.

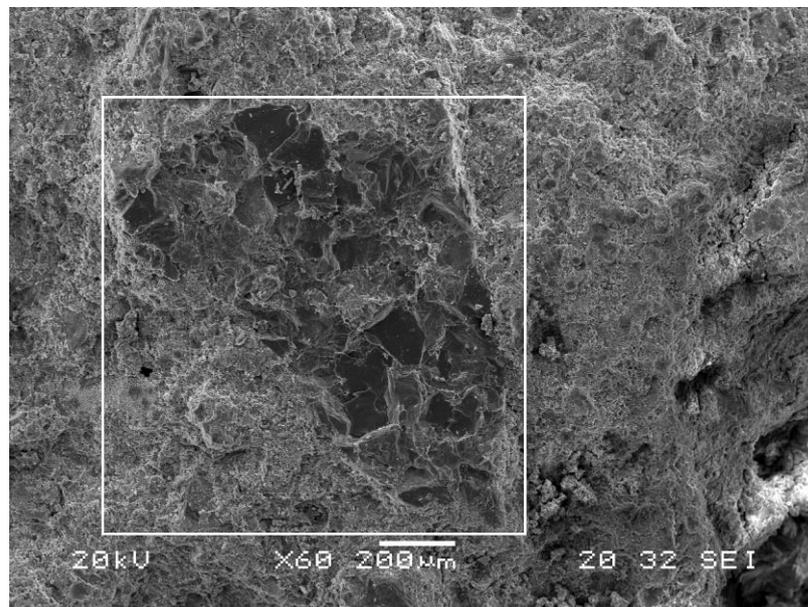


Figura 75. Micrografía del mortero MG 7 endurecido. Matriz y partícula de arena silícea.

El mismo campo anterior puede verse en la Figura 76. En esta imagen SEM (con electrones retrodispersados) destacan dos pequeñas zonas de color más claro.

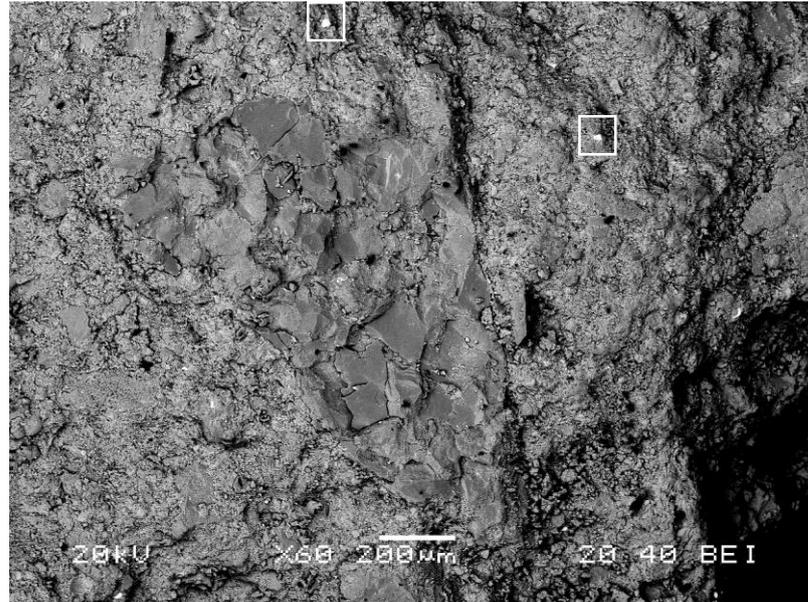


Figura 76. Micrografía del mortero MG 7 endurecido. Pequeños cristales de pirita.

Mediante el microanálisis EDX se ha determinado que corresponden a dos pequeños cristales de pirita. Esta pirita procede de las colas de lavadero de fluorita. En el espectro de energía de la Figura 77, además de las líneas espectrales del Fe y del S correspondientes a la pirita, aparecen, aunque débiles, las correspondientes al Ca, Si y Al. Estos elementos proceden de la excitación del gel C-S-H que recubre parcialmente a la pirita.

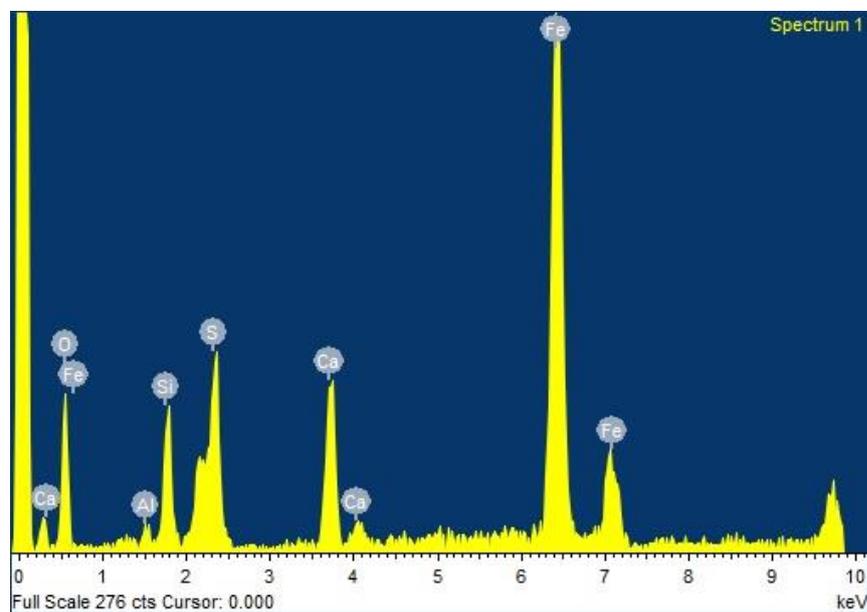


Figura 77. Espectro de energía de la pirita, obtenido mediante EDX.

5.2.15 Impacto medioambiental

Seguidamente, se muestran los resultados de la caracterización (pH, conductividad eléctrica, turbidez y análisis químico cuantitativo) del lixiviado del mortero MG 7.

Cabe destacar que durante los 60 días que la muestra monolítica ha permanecido en el tanque de lixiviación no se ha desprendido ningún trozo de la misma. De hecho, la probeta de mortero no ha sufrido pérdida de peso durante el ensayo.

5.2.15.1 Determinación del pH

En la Tabla 55 se indican los valores de pH de los eluatos recogidos en las 4 etapas del ensayo de lixiviación (a los 3, 7, 30 y 60 días). Los valores que se muestran son los correspondientes a una temperatura del agua de 25 °C.

Tabla 55. Valor de pH del eluato recogido a los 3, 7, 30 y 60 días.

pH	3 días	7 días	30 días	60 días
	11,98	11,43	11,09	10,84

A pesar de que en las sucesivas renovaciones el valor de pH del eluato ha ido disminuyendo, a los 60 días sigue teniendo un valor elevado. Este carácter alcalino del agua de lixiviación es producido principalmente por la portlandita (hidróxido cálcico) que se ha formado durante el fraguado y endurecimiento del cemento.

El [Real Decreto 140/2003](#) establece un valor máximo de 9,5 unidades de pH para las aguas de consumo humano.

5.2.15.2 Determinación de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del eluato recogido en las 4 etapas se muestra en la Tabla 56. Los valores mostrados corresponden a una temperatura del agua de 25 °C.

Tabla 56. Conductividad eléctrica del eluato recogido a los 3, 7, 30 y 60 días.

Conductividad eléctrica [μS/cm]	3 días	7 días	30 días	60 días
	2.132	1.983	1.764	1.516

El lixiviado tiene una conductividad eléctrica relativamente baja, incluso en el agua recogida en la primera etapa (a los 3 días). En el [Real Decreto 140/2003](#) se fija un valor máximo de 2.500 μS/cm para las aguas de consumo humano.

5.2.15.3 Determinación de la turbidez

El resultado de la turbidez del eluato recogido en la última etapa (a los 60 días) es de 3,35 NTU.

El lixiviado presenta un valor de turbidez bajo, inferior al máximo permitido para las aguas de consumo humano, fijado en 5 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) en el [Real Decreto 140/2003](#).

5.2.15.4 Determinación de elementos químicos perjudiciales

Para determinar la composición química del eluato recogido en la última etapa (a los 60 días) se analizaron 12 elementos químicos. Se han utilizado las técnicas analíticas ICP-OES y CVAAS, esta última para determinar la concentración del mercurio.

Los resultados del análisis químico pueden verse en la Tabla 57, donde la concentración viene expresada en $\mu\text{g/l}$.

Tabla 57. Concentración de los elementos lixiviados a los 60 días, en $\mu\text{g/l}$.

Elemento	Concentración [$\mu\text{g/l}$]
As	3,196
Ba	668,123
Cd	< 1
Cr	1,621
Hg	< 1
Mo	1,476
Ni	< 1
Pb	< 1
Sb	< 1
Cu	3,556
Se	< 1
Zn	2,365

Podemos ver que muchos de los metales pesados presentes en el mortero prácticamente no se han lixiviado, lo cual indica que han quedado retenidos en la matriz cementicia, en buena parte debido a la baja permeabilidad del mortero. Y Los elementos liberados lo hacen en concentraciones muy bajas (< 4 $\mu\text{g/l}$), a excepción del bario (Ba) que presenta un valor elevado, debido a su mayor abundancia y solubilidad.

En la Tabla 58 se indican los valores máximos establecidos por el [Real Decreto 140/2003](#). Los valores correspondientes al bario (Ba), molibdeno (Mo) y zinc (Zn) son los que ha fijado la Organización Mundial de la Salud (OMS) para las aguas de consumo humano ([OMS, 2011](#)).

Tabla 58. Valores máximos establecidos, en $\mu\text{g/l}$.

Elemento	Valor máximo [$\mu\text{g/l}$]
As	10
Ba	700*
Cd	5
Cr	50
Hg	1
Mo	70*
Ni	20
Pb	10
Sb	5
Cu	2.000
Se	10
Zn	3.000*

* Valores establecidos por la OMS

Podemos observar que la concentración de los elementos perjudiciales del eluato es inferior al valor máximo establecido por el [Real Decreto 140/2003](#) y por la Organización Mundial de la Salud. Por lo tanto, las aguas subterráneas en contacto con el mortero geotérmico MG 7 no verán afectada su calidad.

Según los resultados obtenidos en los ensayos, queda de manifiesto que el mortero MG 7 no perjudica la calidad de las aguas subterráneas.

5.2.16 Resumen de las características del mortero geotérmico MG 7

En la Tabla 59 se resumen las principales características del mortero desarrollado.

Tabla 59. Características del mortero geotérmico MG 7.

Tipo de mortero	Mortero geotérmico seco (predosificado)
Materiales	Cemento Portland gris (CEM I 42,5 R)
	Arena silíceo de cantera
	Colas de lavadero de fluorita
	Cenizas volantes de central de carbón pulverizado
	Escoria blanca
	Microsílice
	Nanosílice
	Aditivo superplastificante
Agua de amasado	1 litro por cada 6 kg de mortero
Tamaño máximo de árido	2 mm
Porcentaje de árido artificial	30 %
Consistencia (en la mesa de sacudidas)	Fluida (255 mm)
Tiempo de principio de fraguado	230 minutos
Tiempo de final de fraguado	270 minutos
Exudación (a las 3 horas)	0,4 %
Densidad del mortero fresco	2.110 kg/m ³
Densidad mortero endurecido	2.046 kg/m ³
Porosidad abierta	16,7 %
Resistencia a compresión (a los 7 días)	41,9 N/mm ²
Resistencia a compresión (a los 28 días)	47,3 N/mm ²
Resistencia a flexión (a los 7 días)	5,3 N/mm ²
Resistencia a flexión (a los 28 días)	6,1 N/mm ²
Retracción lineal (a los 90 días)	0,9 mm/m
Coefficiente de permeabilidad	3,2·10 ⁻¹¹ m/s
Conductividad térmica	2,01 W/m·K

5.2.17 Comparativa del mortero MG 7 con otros morteros geotérmicos

En Tabla 60 se muestran las tres propiedades más importantes (la conductividad térmica en condiciones secas, el coeficiente de permeabilidad y la resistencia a compresión a los 28 días) del mortero MG 7, del mortero Mix 111 y de 6 morteros comerciales.

El mortero geotérmico Mix 111 ha sido desarrollado por los investigadores Marita Allan y Aristodimos Philippacopoulos ([Allan y Philippacopoulos, 1999](#)) del Laboratorio Nacional de Brookhaven en Nueva York. Este mortero ha sido aprobado por el Departamento de Protección Medioambiental de New Jersey (EE.UU.) y se ha utilizado con éxito en muchos proyectos comerciales de los EE.UU.

Tabla 60. Comparación del mortero MG 7 con otros morteros geotérmicos.

Nombre	Conductividad térmica [W/m·K]	Coefficiente de permeabilidad [m/s]	Resistencia a compresión [N/mm ²]
MG 7	2,01	$3,2 \cdot 10^{-11}$	47,3
Mix 111	2,16	$1,6 \cdot 10^{-12}$	36,7
MASTEC [®] Geotérmico	1,70	$1,0 \cdot 10^{-10}$	5,0
ERKAN GEO	1,80	$1,5 \cdot 10^{-10}$	6,1
EnerGrout HD 2.1	2,10	$1,0 \cdot 10^{-10}$	3,0
PROPAM [®] GEOTHERM	1,90	$3,0 \cdot 10^{-10}$	10,0
GWE Thermokontakt [®]	1,30	$1,0 \cdot 10^{-9}$	3,0
ThermoCem [®] PLUS	2,00	$1,0 \cdot 10^{-10}$	6,0

Comparando los morteros geotérmicos MG 7 y Mix 111 se puede concluir que ambos tienen una conductividad térmica muy parecida. Sin embargo, el mortero geotérmico MG 7 tiene mayor resistencia a compresión, pero menor coeficiente de permeabilidad. Al comparar el mortero MG 7 con los 6 morteros comerciales se puede ver que solo EnerGrout HD 2.1 supera ligeramente la conductividad térmica del mortero MG 7 y que los valores de las otras dos propiedades son mejores en el mortero MG 7 que en los 6 morteros geotérmicos comerciales.

5.2.18 Influencia de la nanosílice en las propiedades del mortero MG 7

Para cuantificar la influencia de la nanosílice en las tres principales propiedades del mortero geotérmico MG 7 se ha preparado un mortero, denominado MG 8, con los mismos materiales y dosificación que el mortero MG 7, excepto la nanosílice. En la Tabla 61 se muestran los resultados obtenidos. La diferencia entre los dos morteros es del 9,95 % en la conductividad térmica, del 15,63 % en el valor del coeficiente de permeabilidad y del 12,47 % en la resistencia a compresión a 28 días.

Tabla 61. Resultados obtenidos con nanosílice (MG 7) y sin nanosílice (MG 8).

Nombre	Conductividad térmica [N/mm ²]	Coefficiente de permeabilidad [m/s]	Resistencia a compresión [N/mm ²]
MG 7	2,01	$3,2 \cdot 10^{-11}$	47,3
MG 8	1,81	$3,7 \cdot 10^{-11}$	41,4

6. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se han alcanzado los dos objetivos principales marcados en la tesis, pues se ha desarrollado un equipo de medida de la conductividad térmica de muestras realizadas con relleno geotérmico y se ha desarrollado un mortero geotérmico predosificado, en el que se utilizan residuos de la industria y nanopartículas.

A continuación, se exponen las conclusiones generales y las futuras líneas de investigación.

6.1 Conclusiones generales

Del análisis de los resultados precedentes se extraen las conclusiones siguientes:

- **Equipo MCT**
 - Se ha desarrollado un equipo, de nombre MCT, especialmente diseñado para llevar a cabo la medida de la conductividad térmica de rellenos geotérmicos, aunque también puede utilizarse con otros materiales, como refractarios, hormigones, áridos o testigos de sondeos. Este equipo de medida se diseña y construye como una aplicación directa de un modelo teórico de transferencia de calor por conducción en un medio infinito, homogéneo e isótropo, a partir de una fuente de calor lineal de longitud infinita y flujo radial.
 - El equipo MCT presenta una elevada repetibilidad, pues los valores de conductividad térmica obtenidos al ensayar una misma muestra tienen muy poca dispersión. En las condiciones estudiadas y rango 0,13-2,80 W/m·K, el equipo tiene una precisión relativa del 5 %.
 - El equipo MCT también tiene una elevada exactitud, pues tanto los valores obtenidos al ensayar las muestras-patrón como los rellenos geotérmicos de uso común discrepan un máximo del 3 % de los valores declarados por los fabricantes y los reportados en la literatura.
 - El equipo permite medir materiales conformados y materiales disgregados.
 - El equipo MCT es fiable, económico, ligero y de fácil construcción y manejo. Además, no es necesario realizar una ranura en las muestras.
 - Para conductividades térmicas mayores de 1,20 W/m·K, debe utilizarse una potencia térmica por unidad de longitud de 56 W/m (1,5 A) o bien de 100 W/m (2 A). Para conductividades térmicas de valores comprendidos en el rango 0,70-1,20 W/m·K, es adecuado el uso de una potencia térmica por unidad de longitud de 25 W/m (1 A), 56

W/m (1,5 A) o 100 W/m (2 A). Para conductividades térmicas menores de 0,70 W/m·K es adecuado una potencia térmica por unidad de longitud de 25 W/m (1 A) e incluso de 6 W/m (0,5 A).

- Para valores de conductividad térmica menor o igual a 0,70 W/m·K es suficiente con utilizar probetas de tamaño 110 mm x 50 mm x 35 mm. Si la conductividad térmica es mayor de 0,70 W/m·K es suficiente con utilizar probetas de tamaño 180 mm x 70 mm x 50 mm, incluso para valores tan altos como 2,80 W/m·K (muestra CN-90BA). Por tanto, no es necesario el uso de probetas de tamaño grande (240 mm x 120 mm x 60 mm), para el rango de conductividades térmicas estudiado.

- **Mortero geotérmico MG 7**

- Se ha desarrollado un mortero geotérmico seco (predosificado), denominado MG 7. Se trata de un mortero de base cemento que lleva un 30 % de árido artificial (colas de lavadero, escoria blanca, cenizas volantes y microsílíce) y un 2 % de nanosílíce.
- En la formulación del mortero MG 7 se ha utilizado un 10 % de colas de lavadero de fluorita y un 10 % de escoria blanca. Estos residuos industriales prácticamente no tienen aplicación comercial, por eso su utilización en los morteros geotérmicos supone una considerable valorización para estos materiales.
- El uso de un 2 % de nanosílíce en el mortero MG 7 le confiere una mejora de aproximadamente entre un 10-15 % en las tres propiedades principales de un mortero geotérmico: conductividad térmica, permeabilidad y resistencia a compresión.
- El mortero MG 7 tiene una conductividad térmica de $2,01 \pm 0,08$ W/m·K (K=2). Este valor es superior al de la mayoría de los morteros geotérmicos comerciales. Los valores de resistencia mecánica y permeabilidad del mortero MG 7 son mejores que los de los morteros comerciales estudiados.
- El mortero MG 7 presenta unos valores despreciables de exudación a las 3 horas y de retracción lineal a los 90 días. Durante el estudio de la homogeneidad del mortero, también se ha comprobado que no presenta anisotropía ni segregación.
- El mortero MG 7 tiene un tiempo de principio de fraguado superior a 3 horas y, por tanto, suficiente para la puesta en obra en un sondeo geotérmico de baja temperatura. Además, la consistencia fluida del mortero MG 7 permite su adecuada inyección en el sondeo geotérmico.
- El mortero MG 7 ha mostrado un adecuado comportamiento frente a los ciclos de hielo-deshielo y humedad-sequedad, con un pequeño porcentaje de pérdida de peso

y resistencia mecánica, pero sin la presencia de fisuras, grietas, desmoronamiento o descamación.

- El ensayo de adherencia indica que el mortero geotérmico MG 7 resiste perfectamente la dilatación térmica a los que podría estar sometido.
- El mortero geotérmico MG 7 es medioambientalmente seguro. Los parámetros físicos, organolépticos y químicos analizados en el eluato cumplen la normativa y los valores máximos fijados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para las aguas de consumo.

Por lo tanto, después de validar el equipo presentado, se puede concluir que, dentro de las condiciones estudiadas y en el rango $0,13-2,80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, tiene una elevada exactitud y precisión comparable a la obtenida con el equipo comercial Shotherm QTM-F1, por lo que se considera que es un equipo adecuado para la medida de la conductividad térmica de los rellenos geotérmicos. Además, el equipo MCT es de fácil construcción y manejo, fiable, económico y ligero.

Por otra parte, tras una exhaustiva selección de materiales, dosificación y caracterización física, térmica, mecánica, mineralógica, microestructural y química, se puede concluir que el mortero geotérmico MG 7 satisface todos los requerimientos medioambientales, de permeabilidad, exudación, conductividad térmica, etc. Por tanto, tiene unas propiedades muy adecuadas para su utilización en los sondeos geotérmicos de muy baja temperatura. Además, el mortero geotérmico MG 7 es económico y los materiales utilizados están fácilmente disponibles en el entorno en el que se desarrolla la investigación.

6.2 Futuras líneas de investigación

Se consideran las siguientes:

- Validar el equipo MCT para un rango mayor de conductividad térmica o determinar cuál sería el rango del equipo, así como su precisión.
- Utilizar ciertos aislantes eléctricos que, debidamente colocados entre la muestra a ensayar y el elemento de medición del equipo MCT permitirían medir la conductividad térmica en aquellos materiales que conduzcan la electricidad (por ejemplo, rellenos geotérmicos en condiciones de saturación o morteros a los que se adicionan virutas de aluminio).
- Ensamblar todos los componentes del equipo MCT en una caja, obteniendo de este modo un equipo portátil para su uso en campo.

- Colocar el elemento de medición en una muestra fresca de mortero MG 7 de manera que quede embebido en el mismo una vez fraguada y endurecida. De este modo, al realizar el ensayo de conductividad térmica se elimina la resistencia de contacto y se puede ver la influencia que esta tiene, comparando el valor de conductividad térmica así obtenido con el que se obtiene en un ensayo convencional utilizando una muestra formada por dos probetas.
- Embeber un termopar en una muestra fresca de mortero MG 7, pudiendo así medir la temperatura de este durante el fraguado y ver si se supera la temperatura máxima que puede soportar una tubería de PEAD. Con este ensayo también se determina el momento a partir del cual se puede hacer el ensayo TRT sin que se vea afectado por el calor de hidratación del mortero geotérmico.
- Desarrollar un mortero geotérmico en el que se utilice MgO, ya que presentan una elevada conductividad térmica y no se encuentra referenciado en la literatura.
- Desarrollar un mortero geotérmico en el que una parte del conglomerante sea un subproducto industrial. Por ejemplo, la fluoranhidrita en su proceso de fabricación consume mucha menos agua y emite muchos menos contaminantes que el cemento. La fluoranhidrita además tiene mayor conductividad térmica que el cemento, pero no puede utilizarse en presencia de agua. Por tanto, habrá que determinar en qué proporción óptima debería mezclarse con el cemento para conseguir un mortero que fragüe y endurezca bajo el agua en un tiempo y condiciones adecuadas.
- Estudiar la influencia que tiene en las propiedades del mortero geotérmico el hecho de fraguar y endurecer sometidos a una elevada presión, que es lo que realmente ocurre en campo ya que, debido a la fluidez del mortero, este estará muy compactado, especialmente a medida que aumenta la profundidad del sondeo. Para ello se puede utilizar una célula triaxial y una prensa.
- Llevar a cabo el estudio de la reactividad álcali-sílice. Se han utilizado cenizas volantes, microsílíce y nanosílíce en la formulación del mortero MG 7, con lo que se previenen las reacciones RAS y, además, todos los materiales utilizados tienen un contenido reducido de álcalis. Pero, no obstante, se plantea la realización de un estudio que determine que efectivamente los áridos del mortero geotérmico MG 7 no son reactivos (no hay ópalo, tridimita, cristobalita, calcedonia...). Para este estudio, se propone la realización de un análisis petrográfico utilizando el microscopio óptico o un ensayo acelerado de probetas de mortero en una disolución de NaOH (sosa cáustica).

7. GLOSARIO

7.1 Morteros

Se definen, a continuación, los siguientes términos ([Jiménez Montoya et al., 2000](#); [Bustillo Revuelta, 2008](#); [Bustillo Revuelta et al., 2001](#); [Bielza Feliú, 1999](#)):

- Dosificación: son las proporciones en que deben mezclarse los componentes que forman el relleno para obtener una masa que reúna las propiedades adecuadas. Puede expresarse en peso o en volumen, y a su vez, mediante los porcentajes de los distintos componentes o mediante cocientes de unos componentes respecto a otros.
- Conglomerante: es la sustancia capaz de endurecer a corto o largo plazo al mezclarse con agua y, por lo tanto, es susceptible de ser utilizada en la unión de materiales de diversa naturaleza.
- Pasta: es la mezcla que resulta del amasado de un conglomerante con agua. También pueden añadirse aditivos.
- Mortero: es la mezcla un conglomerante, áridos finos y/o adiciones. También puede incorporar aditivos. Se entiende por árido fino, aquel de tamaño menor de 2 mm.
- Finos: son la fracción granulométrica de un árido que pasa por el tamiz de 63 micras.
- Lechada: es el nombre que recibe la pasta o el mortero, de consistencia fluida.
- Relación árido/cemento: es el cociente entre el peso (o volumen) del árido utilizado y el peso (o volumen) del cemento. Se utiliza para expresar la dosificación.
- Relación adición/cemento: es el cociente entre el peso (o volumen) de la adición utilizada y el peso (o volumen) del cemento. Se utiliza para expresar la dosificación.
- Relación agua/cemento: es el cociente entre el peso (o volumen) del agua utilizado y el peso (o volumen) del cemento. Este cociente debe tener un valor tan pequeño como sea posible, pero alcanzando la fluidez adecuada para una correcta puesta en obra.
- Fraguado: es el resultado de un conjunto de reacciones químicas de hidratación que se producen en el conglomerante. El inicio del fraguado depende de varios factores, pero es un proceso que comienza poco tiempo después de amasado el mortero. El final de fraguado viene determinado por la pérdida de plasticidad del mortero.

- **Endurecimiento:** es el proceso que se produce una vez finaliza el fraguado y que, al igual que este, es consecuencia del conjunto de reacciones químicas de hidratación que se producen en el conglomerante, mediante las cuales éste adquiere resistencia mecánica.
- **Masa fresca:** se le llama así a la pasta o al mortero que puede moldearse debido a su plasticidad. Este carácter es consecuencia de que aún no ha comenzado el fraguado.
- **Muestra:** Es la cantidad de material recogido, puede ser disgregado o procedente de una masa fresca, para su posterior ensayo. Las muestras pueden estar constituidas por una o varias probetas, que a su vez pueden tener forma cilíndrica, semicilíndrica, paralelepípeda, esférica, etc.
- **Granulometría:** es la medida del tamaño de los granos de los conglomerantes, áridos, y adiciones. Cuando en un árido existen fracciones de todos los tamaños se dice que la granulometría es continua. La granulometría afecta a la segregación, exudación, durabilidad, permeabilidad y resistencia mecánica del mortero.
- **Capilaridad:** es el fenómeno por el cual el agua asciende a través del relleno, como consecuencia de la existencia en éste de una red de pequeños tubos, llamados capilares. Cuando menor sea el tamaño del poro mayor será la capilaridad, pero menor será la permeabilidad.
- **Exudación:** es un fenómeno que consiste en la separación natural del agua de la mezcla fresca, antes de que se produzca el fraguado. Se produce el ascenso del agua, al ser menos densa que las partículas de los áridos. La exudación disminuye la durabilidad y la impermeabilidad del mortero, pues el agua al ir migrando desde el interior va creando unos conductos capilares.
- **Segregación:** es el fenómeno por el cual algunos componentes del relleno tienden a separarse, unos de otros, en función de su tamaño y densidad. Ocurre, principalmente, cuando la puesta en obra es por caída libre. La segregación es indeseable, ya que afecta a la durabilidad, la homogeneidad y la resistencia mecánica del relleno.
- **Retracción:** es la pérdida de volumen producida en el relleno durante su fraguado y endurecimiento. Este proceso se produce por la pérdida paulatina de agua, así pues, no ocurre si el mortero está sumergido en agua.

La retracción, cuyo principal efecto es la aparición de grietas o fisuras en el relleno, es mayor al aumentar la presencia de tamaños finos y la cantidad de agua utilizada para el amasado. También depende del tipo y granulometría de los áridos. La retracción

puede ser de tres tipos (plástica, de secado y de carbonatación), siendo la retracción de secado la más importante.

- Curado: es el proceso consistente en el mantenimiento, durante el fraguado y primer endurecimiento del relleno, del grado de humedad y temperatura necesarias para evitar la desecación del mismo, mejorar la hidratación del conglomerante e impedir una retracción prematura de la mezcla.
- Reacción Álcali-Sílice (RAS): Es una reacción expansiva producida entre la sílice reactiva de los áridos y los álcalis (Na y K) presentes en el cemento, áridos, aditivos o agua de amasado. Las principales formas reactivas de la sílice son la tridimita, la cristobalita, el ópalo y la calcedonia ([Lanza Fernández, 2012](#)).
- Gel C-S-H. Es un compuesto amorfo que está formado por silicato de calcio hidratado y constituye el principal componente de la pasta de cemento. Hay dos tipos de geles C-S-H: los primarios, procedentes de la hidratación de la alita y belita del clinker del cemento y los secundarios, procedentes de la reacción química entre las puzolanas y la portlandita que se forma durante la hidratación del cemento.

7.1 Metrología

Se definen a continuación los siguientes términos ([CEM, 2008](#); [CEM, 2012](#)):

- Mensurando: magnitud particular sometida a medición.
- Calibración: operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.
- Deriva: variación lenta de una característica metrológica de un instrumento o equipo de medida.
- Exactitud: proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.
- Precisión: proximidad entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, bajo condiciones especificadas. Es muy habitual que la precisión se exprese numéricamente mediante medidas de dispersión, tales como la desviación típica o el coeficiente de variación, también denominado desviación típica relativa.

- Condiciones de repetibilidad: estas condiciones incluyen el mismo procedimiento de medida, el mismo operador, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto en un periodo corto de tiempo.
- Incertidumbre de medida: es el parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mesurando. La incertidumbre de medida incluye numerosas componentes, algunas de las cuales se pueden calcular mediante una evaluación tipo A, mientras que otras pueden calcularse mediante una evaluación tipo B.
- Evaluación tipo A: método de evaluación de la incertidumbre mediante análisis estadístico de series de observaciones.
- Evaluación tipo B: método de evaluación de la incertidumbre por medios distintos al análisis estadístico de series de observaciones.
- Error sistemático: aquel que es constante a lo largo de todo el proceso de medida y, por tanto, afecta a todas las medidas de un modo definido y es el mismo para todas ellas. En inglés se denomina bias.
- Valor atípico: es una observación extrañamente grande o pequeña y, por tanto, debe ser eliminada de la serie de observaciones. En inglés se denomina outlier.
- Incertidumbre estándar combinada: es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo éstos las varianzas o covarianzas ponderadas en función de la variación del resultado de medida.
- Factor de cobertura: factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre estándar combinada, para obtener la incertidumbre expandida.
- Incertidumbre expandida: magnitud que define un intervalo en torno al resultado de una medición, y en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1 Publicaciones científicas en revistas y congresos

Allan, M.L. (2000). Materials characterization of superplasticized cement-sand grout. *Cement and Concrete Research*, 30, 937-942.

Allan, M.L. (2015). Quality control and troubleshooting for grouts used with geothermal heat pumps. World Geothermal Congress, Melbourne, 2015.

Allan, M.L., Kavanaugh, S.P. (1999). Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps. *International Journal of HVAC&R Research*, 5, (2), 87-98.

Allan, M.L., Philippacopoulos, A.J. (2000). Performance characteristics and modelling of cementitious grouts for geothermal heat pumps. World Geothermal Congress, Tohoku, 2000.

Alonso-Sánchez T., Rey-Ronco M.A., Carnero-Rodríguez F.J., Castro-García M.P. (2012). Determining ground thermal properties using logs and thermal drill cutting analysis. First relationship with thermal response test in principality of Asturias, Spain. *Applied Thermal Engineering*, 37, 226-234.

Alrtimi, A. A., Rouainia, M., Manning, D. A. C. (2013). Thermal enhancement of PFA-based grout for geothermal heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 54, 559-564.

Assael, M.J., Antoniadis, K.D., Wakeham, W.A. (2010). Historical evolution of the transient hot-wire technique. *International Journal of Thermophysics*, 31, 1051-1072.

Balbay, A., Esen, M. (2010). Experimental investigation of using ground source heat pump system for snow melting on pavements and bridge decks. *Scientific Research and Essays*, 5, 3955-3966.

Balo, F., Yucel, H.L. (2013). Assessment of thermal performance of green building materials produced with plant oils. *International Journal of Material Science (IJMSCI)*, 3, 118-129.

Berndt, M.L. (2010). Strength and permeability of steel fibre reinforced grouts. *Construction and Building Materials*, 24, 1768-1772.

Berndt, M.L., Philippacopoulos, A.J. (2002). Incorporation of fibres in geothermal well cements. *Geothermics*, 31, 643-656.

Bertani, R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 60, 31-43.

Beziat, A., Dardaine, M., Gabis, V. (1988). Effect of compaction pressure and water content on the thermal conductivity of some natural clays. *Clays and Clay Minerals*, 36, 462-466.

Borinaga Treviño, R., Pascual Muñoz, P., Calzada Pérez, M.A., Castro Fresno, D. (2014). Freeze–thaw durability of cement-based geothermal grouting materials. *Construction and Building Materials*, 55, 390-397.

Borinaga Treviño, R., Pascual Muñoz, P., Castro Fresno, D., Blanco Fernández, E. (2013). Borehole thermal response and thermal resistance of four different grouting materials measured with a TRT. *Applied Thermal Engineering*, 53, 13-20.

Borinaga Treviño, R., Pascual Muñoz, P., Castro Fresno, D., Del Coz Díaz, J.J. (2012). Study of different grouting materials used in vertical geothermal closed-loop heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 50, 159-167.

Bose, J.E., Smith, M.D., Spitler, J.D. (2002). Advances in ground source heat pump systems. An international overview. Proceedings of the Seventh International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, China.

Busso, A.J., Reuss, M., Müller, J., Sogari, N. (2000). Almacenamiento subterráneo de energía térmica: resultados de un ensayo de respuesta térmica del subsuelo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4, Nº 1.

Coquard, R., Baillis, D., Quenard, D. (2006). Experimental and theoretical study of the hot-wire method applied to low-density thermal insulators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 4511-4524.

Côté, J., Konrad, J.M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 443-458.

Côté, J., Konrad, J.M. (2009). Assessment of structure effects on the thermal conductivity of two-phase porous geomaterials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 796-804.

Daehoon, K., Gyoungman, K., Donghui, K., Hwanjo, B. (2017). Experimental and numerical investigation of thermal properties of cement-based grouts used for vertical ground heat exchanger. *Renewable Energy*, 112, 260-267.

Daehoon, K., Seokhoon, O. (2019). Relationship between the thermal properties and degree of saturation of cementitious grouts used in vertical borehole heat exchangers. *Energy and Buildings*, 201, 1-9.

Daouas, N., Fguiri, A., Radhouani, M. (2008). Solution of a coupled inverse heat conduction-radiation problem for the study of radiation effects on the transient hot wire measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1766-1778.

De Isabel, J.A. (2010). Optimización económica en una instalación geotérmica: "Material de relleno". *Ingeopres*, 189, 80-83.

Deerman, J.D., Kavanaugh, S.P. (1991). Simulation of vertical U-tube ground coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution. *ASHRAE Transactions*, 97, 287-295.

Dehdezi, P. K., Hall, M. R., Dawson, A. R. (2011). Enhancement of soil thermo-physical properties using microencapsulated phase change materials for ground source heat pump applications. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 110-116, 1191-1198.

Delaleux, F., Py, X., Olives, R., Dominguez, A. (2012). Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 33-34, 92-99.

Demirboğa, R. (2003). Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and Building*, 35, 189-192.

Dequan, K., Rong, W., Jianxun, C., Jiayuan, K., Xintong, J. (2020). Effect of gradation on the thermal conductivities of backfill materials of ground source heat pump based on loess and iron tailings. *Applied Thermal Engineering*, 180, 115814.

Dos Santos, W.N. (2002). O método do fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. *Cerâmica*, 48, (306), 86-91.

Dos Santos, W.N. (2005a). Thermal properties of melt polymers by the hot wire technique. *Polymer Testing*, 24, 932-941.

Dos Santos, W.N. (2005b). Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: II - o método do fio quente. *Cerâmica*, 51, 371-380.

Dos Santos, W.N. (2008). Advances on the hot wire technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 15-20.

Dos Santos, W.N., Gregório, R. (2003). Numerical and experimental determination of minimum and maximum measuring times for the hot wire parallel technique. *Cerâmica*, 49, 29-35.

Dos Santos, W.N., Gregório, R. (2004). Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 14, 354-359.

Erol, S., François, B. (2014). Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 70, 788-799.

Erol, S., François, B. (2016). Freeze damage of grouting materials for borehole heat exchanger: Experimental and analytical evaluations. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 5, 29-41.

Esen, Y., Yilmazer, B. (2010). Investigation of some physical and mechanical properties of concrete produced with barite aggregate. *Scientific Research and Essays*, 5, 3826-3833.

Eskilson, P., Claesson, J. (1988). Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. *Numerical Heat Transfer*, 13, 149-165.

Fernández Pérez, A., Sanner, B., Gieb, C., Mands, E., Novelle, L. (2010). Influencia del tipo de relleno del sondeo en la eficiencia del campo de captación geotérmico. II Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria (GeoEner).

Florides, G., Christodoulides, P., Pouloupatis, P. (2013). Single and double U-tube ground heat exchangers in multiple-layer substrates. *Applied Energy*, 102, 364-373.

Florides, G., Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers-a review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32, 2461-2478.

Franco, A. (2007). An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2495-2504.

Griesinger, A., Spindler K., Hahne E. (1999). Measurements and theoretical modelling of the effective thermal conductivity of zeolites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 4363-4374.

Hamilton, R.L., Crosser, O.K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1, 187-191.

Hammerschmidt, U., Sabuga, W. (2000). Transient Hot Wire (THW) method: uncertainty assessment. *International Journal of Thermophysics*, 21, (6), 1255-1278.

Han, C., Yu, X. (2016). Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system. *Applied Energy*, 170, 148-160.

Haupin, W.E. (1960). Hot wire method for rapid determination of thermal conductivity. *American Ceramic Society Bulletin*, 39, 139-141.

Hellström, G. (1998). Thermal performance of borehole heat exchangers. The Second Stockton International Geothermal Conference, New Jersey, USA.

Indacochea Vega, I., Pascual Muñoz, P., Castro Fresno, D., Calzada Pérez, M.A. (2015). Experimental characterization and performance evaluation of geothermal grouting materials subjected to heating-cooling cycles. *Construction and Building Materials*, 98, 583-592.

Indacochea Vega, I., Pascual Muñoz, P., Castro Fresno, D., Zamora Barraza, D. (2018). Durability of geothermal grouting materials considering extreme loads. *Construction and Building Materials*, 162, 732-739.

Ishido, Y., Kawamura, M., Ono, S. (1982). Thermal conductivity of magnesium-nickel hydride powder beds in a hydrogen atmosphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7, 173-182.

Jannot, Y., Degiovanni, A. (2019). An improved model for the parallel hot wire: Application to thermal conductivity measurement of low density insulating materials at high temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 142, 379-391.

Jannot, Y., Degiovanni, A., Schick, V., Meulemans, J. (2021). Apparent thermal conductivity measurement of anisotropic insulating materials at high temperature by the parallel hot-wire method. *International Journal of Thermal Sciences*, 160, 106672.

Jin, L., Wei, X., Tao, H., Wei, X., Joachim, R. (2019). Thermo-economic analysis of borehole heat exchangers (BHE) grouted using drilling cuttings in a dolomite area. *Applied Thermal Engineering*, 150, 305-315.

Jun, L., Xu, Z., Jun, G., Jie, Y. (2009). Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump systems. *Renewable Energy*, 34, 2898-2904.

Khan, M.I. (2002). Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*, 37, 607-614.

Lee, C., Lee, K., Choi, H., Choi, H. (2010). Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea. *Science China Technological Sciences*, 53, 123-128.

- Li, X., Chen, Z., Zhao, J. (2006). Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground coupled heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1564-1571.
- Liu, K., Wang, Z., Jin, C., Wang, F., Lu, X. (2015). An experimental study on thermal conductivity of iron ore sand cement mortar. *Construction and Building Materials*, 101, 932-941.
- Liu, Z.Y., Cacciola, G., Restuccia, G., Giordano, N. (1990). Fast simple and accurate measurement of zeolite thermal conductivity. *Zeolites*, 10, (6), 565-570.
- Llavona, M.A. (1995a). Determinación de la conductividad térmica de materiales I. Métodos estacionarios. *Información Tecnológica*, 6, (2), 37-44.
- Llavona, M.A. (1995b). Determinación de la conductividad térmica de materiales II. Método del hilo caliente y de la lámina caliente. *Información Tecnológica*, 6, (2), 45-56.
- Llavona, M.A. (1995c). Determinación de la conductividad térmica de los materiales III. Métodos Flash. *Información Tecnológica*, 6, (2), 57-64.
- Llavona, M.A. (1995d). Determinación de la conductividad térmica de alúminas industriales. *Información Tecnológica*, 6, (3), 11-22.
- Lund, J.W., Boyd, T.L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.
- Martínez Ramírez, S., Blanco Varela, M.T. (2008). Caracterización estructural y microestructural de geles C-S-H. X Congreso Nacional de Materiales.
- Mohammad, A., Mehdi, A., Mickey, T., Majid, B. (2016). An improved transient plane source method for measuring thermal conductivity of thin films: deconvoluting thermal contact resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96, 371-380.
- Montaser, M., Mohamad, R., Keith, P., Mohammad, A.A., Tabbi, W., Abdul, O., Sumsun, N. (2021). A review of grout materials in geothermal energy applications. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100070.
- Mounanga, P., Khelidj, A., Bastian, G. (2004). Experimental study and modelling approaches for the thermal conductivity evolution of hydrating cement paste. *Advances in Cement Research*, 16, 95-103.
- Ortiz de Zárate, J.M., Hita, J.L., Khayet, M., Legido, J.L. (2010). Measurement of the thermal conductivity of clays used in pelotherapy by the multi-current hot-wire technique. *Applied Clay Science*, 50, 423-426.

Park, S., Sung, C., Jung, K., Sohn, B., Chauchois, A., Choi, H. (2015). Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1061-1071.

Pascual Muñoz, P., Indacochea Vega, I., Zamora Barraza, D., Castro Fresno, D. (2018). Experimental analysis of enhanced cement-sand-based geothermal grouting materials. *Construction and Building Materials*, 185, 481-488.

Peralta, M.V., Assael, M.J., Dix, M.J., Karagiannidis, L., Wakeham, W.A. (2006). A novel instrument for the measurement of the thermal conductivity of molten metals. Part 1: instrument's description. *International Journal of Thermophysics*, 27, 353-375.

Philippacopoulos, A.J., Berndt, M.L. (2001). Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. *Geothermics*, 30, 527-545.

Rey-Ronco M.A., Alonso-Sánchez T., Copen-Rodríguez J., Castro-García M.P. (2013). A thermal model and experimental procedure for a point-source approach to determining the thermal properties of drill cuttings. *Journal of Mathematical Chemistry*, 51, 1139-1152.

Rixing, H., Aichun, M., Yahui, W. (2018). Transient hot wire measures thermophysical properties of organic foam thermal insulation materials. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 98, 674-682.

Rottmann, M., Beikircher, T., Ebert, H.P. (2020). Thermal conductivity of evacuated expanded perlite measured with guarded-hot-plate and transient-hot-wire method at temperatures between 295 K and 1073 K. *International Journal of Thermal Sciences*, 125, 106338.

Sáez Blázquez, C., Farfán Martín, A., Martín Nieto, I., Carrasco García, P., Sánchez Pérez, L.S., González-Aguilera, D. (2017a). Analysis and study of different grouting materials in vertical geothermal closed-loop systems. *Renewable Energy*, 114, 1189-1200.

Sáez Blázquez, C., Farfán Martín, A., Martín Nieto, I., Carrasco García, P., Sánchez Pérez, L.S., González-Aguilera, D. (2017b). Efficiency analysis of the main components of a vertical closed-loop system in a borehole heat exchanger. *Energies*, 10, 201.

Sales, A., Rodrigues de Souza, F., dos Santos, W.N., Mendes Zimer, A., do Couto Rosa Almeida, F. (2010). Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. *Construction and Building Materials*, 24, 2446-2453.

Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinós, D., Rybach, L. (2003). Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32, 579-588.

Sharqawy, M.H., Mokheimer, E.M., Badr, H.M. (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*, 38, 271-277.

Smith, M.D., Perry, R.L. (1999). Borehole grouting: field studies and thermal performance testing. *ASHRAE Transactions*, 105, 451-457.

Tan Manh, D., Anh Ngoc, D., Gyeong O, K., Young Sang, K. (2019). Utilization of marine dredged soil in controlled low-strength material used as a thermal grout in geothermal systems. *Construction and Building Materials*, 215, 613-622.

Tan Manh, D., Hyeong Ki, K., Min Jun, K., Young Sang, K. (2020). Utilization of controlled low strength material (CLSM) as a novel grout for geothermal systems: laboratory and field experiments. *Journal of Building Engineering*, 29, 101110.

Van der Held, E.F.M., van Drunen, F.G. (1949). A method of measuring the thermal conductivity of liquids. *Physica*, 15, 865-881.

Weibo, Y., Rui, X., Binbin, Y., Jingjing, Y. (2019). Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a borehole ground heat exchanger with PCM backfill. *Energy*, 174, 216-235.

Woodside, W., Messmer, J.M. (1961). Thermal conductivity of porous media. *Journal of Applied Physics*, 32, 1688-1706.

Wulf, R., Barth, G., Gross, U. (2007). Intercomparison of insulation thermal conductivities measured by various methods. *International Journal of Thermophysics*, 28, (5), 1679-1692.

Xin Gang., L. (1995). The boundary induced error on the measurement of thermal conductivity by transient hot wire method. *Measurement Science and Technology*, 6, 467-471.

Yoon, S., Macphee, D.E., Imbabi, M.S. (2014). Estimation of the thermal properties of hardened cement paste on the basis of guarded heat flow meter measurements. *Thermochimica Acta*, 588, 1-10.

Young Sang, K., Ba Huu, D., Tan Manh, D., Gyeong O, K. (2020). Development of thermally enhanced controlled low-strength material incorporating different types of steel-making slag for ground-source heat pump system. *Renewable Energy*, 150, 116-127.

Young Sang, K., Tan Manh, D., Min Jun, K., Bong Ju, K., Hyeong Ki, K. (2018). Utilization of by-product in controlled low-strength material for geothermal systems: engineering performances, environmental impact, and cost analysis. *Journal of Cleaner Production*, 172, 909-920.

Zeng, H., Diao, N., Fang, Z. (2003). Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground loop heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 4467-4481.

Zhang, Q., Murphy, W.E. (2000). Measurement of thermal conductivity for three borehole fill materials used for GSHP. *ASHRAE Transactions*, 106, 434-441.

Zhang, T., Shen, R., Lin, C., Yin, J., Wang, S. (2015). Measuring moisture content in a porous insulation material using a hot wire. *Building and Environment*, 84, 22-31.

Zhang, X., Degiovanni, A., Mailliet, D. (1993). Hot-wire measurement of thermal conductivity of solids: a new approach. *High Temperatures-High Pressures*, 25, 577-584.

8.2 Libros

Abramowitz, M., Stegun, I. A. (1972). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables*. New York: Dover Publications.

Aranda Usón, A., Ortego Bielsa A. (2011). *Integración de energías renovables en edificios*. Zaragoza: Pressas Universitarias de Zaragoza.

ATECYR. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2010). *Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

ATECYR. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. (2012). *Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

Ballester, A., Verdeja, L.F., Sancho, J. (2003). *Metalurgia extractiva. Volumen I. Fundamentos*. Madrid: Editorial Sintesis.

Baron, J., Ollivier, J.P. (1996). *La durabilité des bétons*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

Bielza Feliú, A. (1999). *Manual de técnicas de mejora del terreno*. Madrid: Edita Carlos López Jimeno.

Bustillo Revuelta, M. (2008). *Hormigones y morteros*. Madrid: Fueyo.

Bustillo Revuelta, M., Calvo Sorando, J.P. (2005). *Materiales de Construcción*. Madrid: Fueyo.

- Bustillo Revuelta, M., Calvo Sorando, J.P., Fueyo Casado, L. (2001). *Rocas Industriales*. Madrid: Rocas y minerales.
- Callister, W.D. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2*. Barcelona: Editorial Reverte S.A.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of heat in solids*. London: Oxford University Press.
- Çengel, Y.A., Ghajar, A.F. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México: McGraw-Hill.
- Cornelis, K., Cornelius, J.R. (1997). *Manual de mineralogía*. Barcelona: Editorial Reverte S.A.
- Creus Solé, A. (2008). *Energía geotérmica de baja temperatura*. Barcelona: Cano Pina S.L. Ediciones Ceysa.
- De Juan García, M.A. (2006). Capítulo 9: Confinamiento de dos vertederos de lindano mediante pantallas de bentonita-cemento. *Ingeniería del Terreno. Libro 7*. Madrid: Edita Carlos López Jimeno.
- Eckhart, F. (1991). *Grouting procedures for ground-source heat pump systems*. Oklahoma: Ground Source Heat Pump Publications.
- Eugster, W. J. (2011). Chapter 11: Installation and grouting. *Geotrained training manual for drillers shallow geothermal systems*. Brussels: European Geothermal Energy Council.
- Galán Huertos, E., González Díez, I., Fernández Caliani, J.C. (2003). *Mineralogía aplicada*. Madrid: Editorial Síntesis S.A.
- García Guinea, J., Martínez Frías, J. (1992). *Recursos minerales de España*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- Gil García, G. (2008). *Energías del siglo XXI. De las energías fósiles a las alternativas*. Madrid: Munti-Prensa Libros S.A.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer Gijón, M., Ortuño Abad, L., Oteo Mazo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: PERARSON EDUCACIÓN S.A.
- Hellström, G. (2011). Chapter 6: Borehole Heat Exchangers. *Geotrained training manual for designers shallow geothermal systems*. Brussels: Dr. Maureen Mc Corry with EurGeol. Gareth Ll. Jones.

- IDAE, IGME. (2008). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía e Instituto Geológico y Minero de España. *Manual de geotermia*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Ingersoll, L.R., Zobel, O.J., Ingersoll, A.C. (1954). *Heat conduction with engineering, geological and other applications*. Wisconsin: The University of Wisconsin Press.
- ISRM (1981). *Suggested methods for the rock characterization, testing and monitoring*. Oxford: Pergamon Press.
- Jiménez Montoya, P., García Meseger, A., Morán Cabré, F. (2000). *Hormigón armado*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.
- Lajara Vizcaino, J.R., Pelegrí Sebastiá, J. (2014). *Sistemas integrados con Arduino*. Madrid: Marcombo S.A.
- López Jimeno, C., García Bermúdez, P., Herrera Herbert, J. (2003). *Manual de áridos. Prospección, explotación y aplicaciones*. Madrid: Edita Carlos López Jimeno.
- Luque Cabal, C., Gutiérrez Claverol, M., García Álvarez, J.R., Rodríguez Terente, L.M. (2009). *La fluorita. Un siglo de minería en Asturias*. Oviedo: Lugarmaso. S.L.
- Marco Fondevila, M., Scarpellini S. (2013). *Guía de mercados energéticos*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Martínez Alfaro, P.E., Martínez Santos, P., Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid: Munti-Prensa Libros S.A.
- Montes, J.M., Cuevas, F.G., Cintas, J. (2014). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Madrid: Ediciones Paraninfo S.A.
- Núñez Becerra, D. (2007). Capítulo 8: Lodos tixotrópicos en cimentaciones profundas. *Ingeniería del Terreno. Libro 10*. Madrid: Edita Carlos López Jimeno.
- Orche García, E. (2011). *Energía geotérmica*. Madrid: Edita Carlos López Jimeno.
- Perales Benito, T. (2012). *Instalaciones geotérmicas*. Madrid: Creaciones Copyright S.L.
- Pous, J., Jutglar, L. (2004). *Energía geotérmica*. Barcelona: Ediciones Ceac.
- Rey Martínez, F.J, Velasco Gómez, E. (2005). *Bombas de calor y energías renovables en edificios*. Madrid: THOMSON.

Richerson, D.W, Edward, W. (2005). *Modern ceramic engineering*. London: CRC Press.

Sánchez Naranjo, C. (2010). *Tecnología de las centrales termoeléctricas convencionales*. Madrid: UNED.

Sancho, J., Verdeja, L.F., Ballester, A. (2003). *Metalurgia extractiva. Volumen II. Procesos de obtención*. Madrid: Editorial Sintesis.

Sanner, B. (2011). Chapter 4: Ground Heat Transfer. *Geotrained training manual for designers shallow geothermal systems*. Brussels: Dr. Maureen Mc Corry with EurGeol. Gareth Ll. Jones.

Tong, X.C. (2011). *Advanced materials for thermal management of electronic packaging*. USA: Springer.

Torrente Artero, O. (2016). *El mundo Genuino-Arduino. Curso práctico de formación*. Madrid: RC Libros.

Valdés Pérez, F.E., Pallàs Areny, R. (2007). *Microcontroladores. Fundamentos y aplicaciones con PIC*. Madrid: Marcombo S.A.

Vian Ortuño, A. (1994). *Introducción a la química industrial*. Barcelona: Editorial Reverte S.A.

8.3 Otras fuentes (normativa, tesis, guías, informes...)

Abad Valle, P. (2011). Retención de mercurio en cenizas volantes. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.

Alonso Domínguez, D. (2015). Estudio de la variación de la morfología y las propiedades microestructurales de materiales base cemento con adiciones de sílice de distinta granulometría. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Allan, M.L. (1996). Preliminary study on improvement of cementitious grout thermal conductivity for geothermal heat pump applications. Informal report, BNL 63195. Brookhaven National Laboratory.

Allan, M.L. (1997). Thermal conductive of cementitious grouts for geothermal heat pumps. FY 1997 progress report, BNL 65129. Brookhaven National Laboratory.

Allan, M.L., Philippacopoulos, A.J. (1998). Thermal conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps. FY 1998 progress report, BNL 66103. Brookhaven National Laboratory.

Allan, M.L., Philippacopoulos, A.J. (1999). Properties and performance of cement-based grouts for geothermal heat pump applications. Final report.

Argiz Lucio, C.G. (2014). Estudio de la utilización de las cenizas de cenicero de centrales termoeléctricas de carbón como adición del cemento Portland : análisis comparativo con las cenizas volantes. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

ASTM C490-07. Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete.

ASTM C940-98a. Standard test method for expansion and bleeding of freshly mixed grouts for preplaced-aggregate concrete in the laboratory.

ASTM D5084-90. Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter.

CEM (2008). Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Centro Español de Metrología. Madrid.

CEM (2012). Vocabulario internacional de metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). Centro Español de Metrología. Madrid.

Cuenca Martínez, Y. (2013). Experimental study of thermal conductivity of new mixtures for absorption cycles and the effect of the nanoparticles addition. Doctoral Thesis. Universidad Rovira i Virgili.

Decisión 2013/114/UE de la Comisión, de 1 de marzo de 2013, por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, conforme a lo dispuesto en el artículo 5 de la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, L 62, p. 27-35.

DGC (2005). Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carretera. Ministerio de Fomento. Madrid.

Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. Diario Oficial de la Unión Europea, 5 de junio de 2009, L 140, p. 27.

EA-4/02. (2013). Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration. European Accreditation.

Guarachi Solano J.F. (2015). Propiedades térmicas en composites de concreto. Tesis Doctoral. Instituto Politécnico Nacional de México.

Herrero Vázquez, T. (2015). Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de HEA: Aplicación en pastas y morteros de cemento. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.

IGSHPA. (2016). Closed-loop/geothermal heat pump systems Design and installation standards. Oklahoma State University.

Lanza Fernández V.D (2012). Estudio de la reactividad álcali-sílice originada por componentes reactivos minoritarios. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Lausín González, C. (2014). Valorización de la escoria LD como árido en hormigones y ladrillos cerámicos: estabilización de la cal libre con cenizas volantes. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado número 181, de 29 de julio de 2011.

Llopis Trillo, G. y Rodrigo Angulo, V. (2009). Guía de la energía geotérmica. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM).

Monteagudo Viera, S.M. (2014). Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Moreno Bazán, A. (2018). Optimización en la incorporación de nanoadiciones al cemento para la mejora de sus prestaciones y durabilidad. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Mosquera Arancibia, P. (2013). Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

OMS (2011). Guidelines for drinking-water quality. Fourth Edition. World Health Organization.

ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Boletín Oficial del Estado número 43, de 19 de febrero de 2002, p. 6494-6515.

PG-3 (1976). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Ministerio de Obras Públicas.

Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de hormigón estructural (EHE-08). Boletín Oficial del Estado número 203, de 22 de agosto de 2008.

Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Boletín Oficial del Estado número 45, de 21/02/2003.

Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). Boletín Oficial del Estado número 153, de 25 de junio de 2016.

Showa Denko K.K. Operation manual nº 182. Shotherm QTM F-1. Quick Thermal Conductivity Meter.

UNE 100715-1:2014. Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera. Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical. AENOR.

UNE 80304:2006. Cementos. Cálculo de la composición potencial del clinker Portland. AENOR.

UNE-EN 1015-1:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica. AENOR.

UNE-EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. AENOR.

UNE-EN 1015-11:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. AENOR.

UNE-EN 1015-2:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo. AENOR.

UNE-EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). AENOR.

UNE-EN 1015-6:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. AENOR.

UNE-EN 15863:2015. Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento durante la lixiviación para la caracterización básica. Ensayo de lixiviación dinámico de monolitos con renovación periódica del lixivante en condiciones fijas. AENOR.

UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayos de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. AENOR.

UNE-EN 27888:1993. Calidad del agua. Determinación de la conductividad eléctrica. AENOR.

UNE-EN 480-2:2007. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación del tiempo de fraguado. AENOR.

UNE-EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. AENOR.

UNE-EN 933-2:1996. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas. AENOR.

UNE-EN 993-1:1996. Métodos de ensayo para productos refractarios conformados densos. Parte 1: Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total. AENOR.

UNE-EN ISO 10523:2012. Calidad del agua. Determinación del pH. AENOR.

UNE-EN ISO 11885:2010. Calidad del agua. Determinación de elementos seleccionados por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). AENOR.

UNE-EN ISO 12846:2012. Calidad del agua. Determinación de mercurio. Método por espectrometría de absorción atómica (AAS) con y sin enriquecimiento. AENOR.

UNE-EN ISO 7027-1:2016. Calidad del agua. Determinación de la turbidez. Parte 1: Métodos cuantitativos. AENOR.

Van Gelder, M.F. (1998). A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures. Doctoral Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.

8.4 Páginas web

AccuInstruments: www.accustruments.com

Altium: <http://www.altium.com>

ArcelorMittal: <https://spain.arcelormittal.com/>

Arduino: <http://www.arduino.cc>

Areneros de Olivares: <http://www.arenerosdeolivares.es/>

Asociación Internacional de Geotermia: <http://www.geothermal-energy.org>

Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA): <http://www.aridos.org>

Cantera Grado: <http://www.fhisa.es/>

Cerámica del Nalón: <http://www.ceramicadelnalon.com/>

Cerámica La Espina: www.ceramicalaespina.com

Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC): <http://www.egec.org>

EDP: <https://www.edpenergia.es/es/>

EnergrouT Geotherm: <http://www.energrouT.com/>

Equipo de investigación Q-Thermie: <http://personales.uniovi.es/web/qthermie>

Evonik Industries: <https://corporate.evonik.com/en>

FAEN: www.faen.es

Farnell: <http://es.farnell.com>

FerroAtlántica: <https://www.ferroglobe.com/>

Grupo BASF: <https://www.basf.com>

Grupo Hunosa: <http://www.hunosa.es>

Grupo Masaveu: <http://www.cementostudelaveguin.com>

Grupo MG Chemicals: www.mgchemicals.com

Grupo Minersa: <http://www.minersa.com>

Grupo RHI: <http://www.rhi-ag.com>

HeidelbergCement: <http://www.heidelbergcement.com>

Kyoto Electronics Manufacturing: <https://www.kyoto-kem.com/en>

Master Builder Solutions: <https://www.master-builders-solutions.com/es-es>

Multímetro UT30B: <http://www.manualslib.com>

NETZSCH: <https://www.netzsch.com>

OMEGA Engineering: <http://www.omega.com/>

PH Pailamilla e Hijos: www.comercialph.cl

Plataforma Tecnológica Española de Geotermia, Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (GEOPLAT): <http://www.geoplat.org>

Reciclajes de Santiago: <http://rrsantiago.com/gestion-de-rcd.html>

REHAU: <http://www.rehau.com>

Skamol A/S: <http://www.skamol.com>

TEAIS: <http://www.teais.es>

VDM Metals: www.vdm-metals.com/en

9. ANEXOS

9.1 ANEXO I. Altium Designer 6

Altium Designer es un software que reúne todas las herramientas necesarias para crear un entorno completo para el desarrollo de productos electrónicos. No se trata de un conjunto de paquetes sueltos conectados mediante archivos externos, sino de un único programa que no necesita exportar archivos, facilitando así el diseño de la placa de circuito impreso o PCB (Printed Circuit Board).

El programa Altium Designer lo desarrolla y vende la empresa multinacional [Altium](#), fundada en Australia en 1985.

Las versiones más destacadas desde que comenzó su comercialización son las siguientes: Altium Designer 6, Altium Designer Summer 09, Altium Designer 10, Altium Designer 14, Altium Designer 15 y Altium Designer 16.

La versión Altium Designer 6 permite crear diseños en 3 dimensiones y también permite crear diferentes capas (capa de pistas, capa de serigrafía, capa de dibujo mecánico...) para una mejor gestión del proyecto.

Con el programa Altium Designer 6 se pueden llevar a cabo las siguientes tareas: dibujar los esquemáticos, realizar la simulación de circuitos, crear librerías, importar componentes de distintos fabricantes, generar las huellas o footprints, realizar el ruteo de pistas, tanto de forma manual como automática, generar un modelo en 3D de la placa y generar los archivos de salida (listado de materiales, planos de serigrafía...) para la fabricación de la PCB.

9.2 ANEXO II. Diagrama esquemático del registrador de datos

A continuación, pueden verse los principales componentes y conexiones eléctricas de la PCB del equipo de medida MCT (Figura 78, Figura 79, Figura 80, Figura 81, Figura 82 y Figura 83).

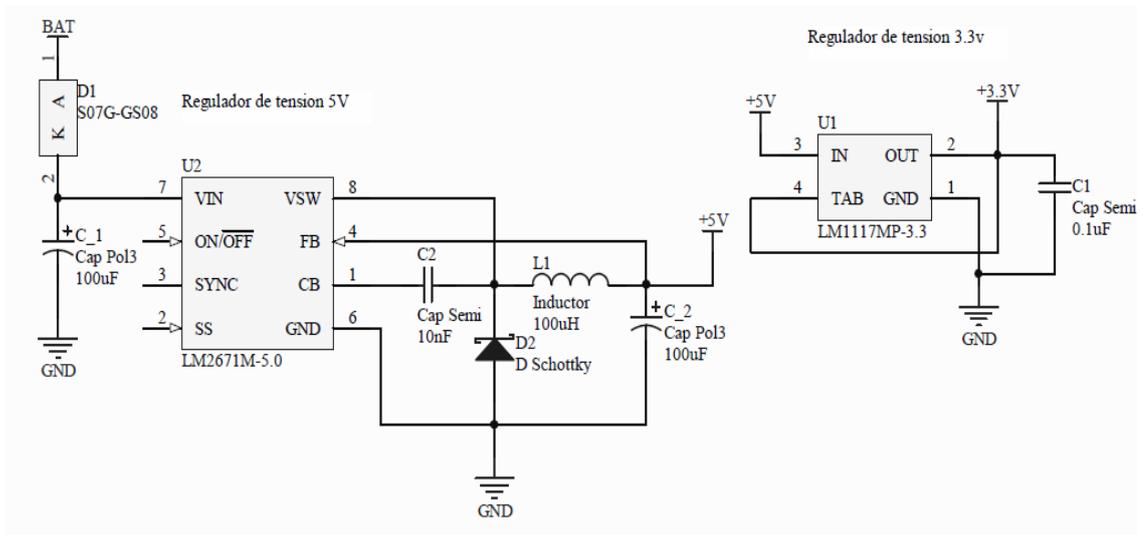


Figura 78. Sistema de alimentación del registrador de datos.

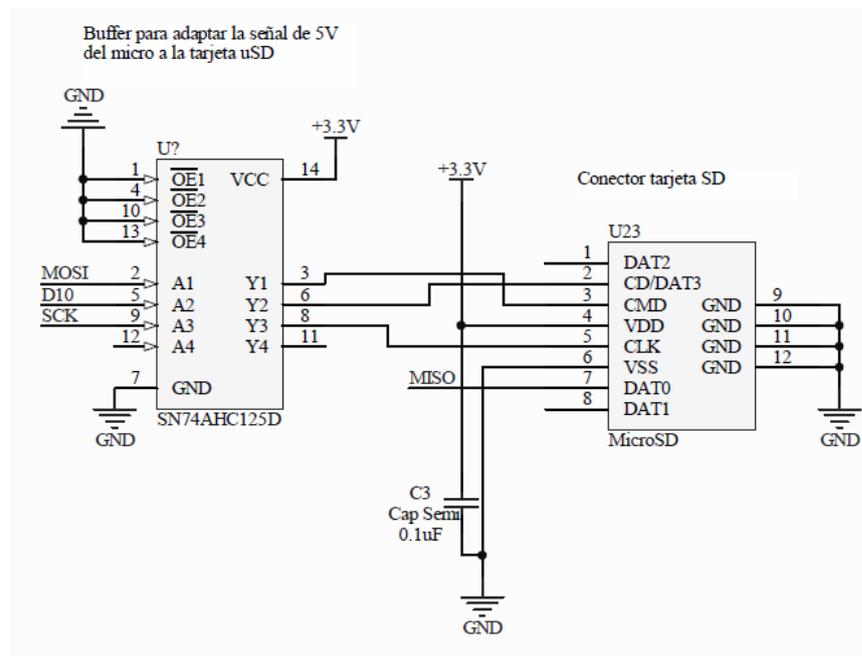


Figura 79. Sistema de almacenamiento del registrador de datos.

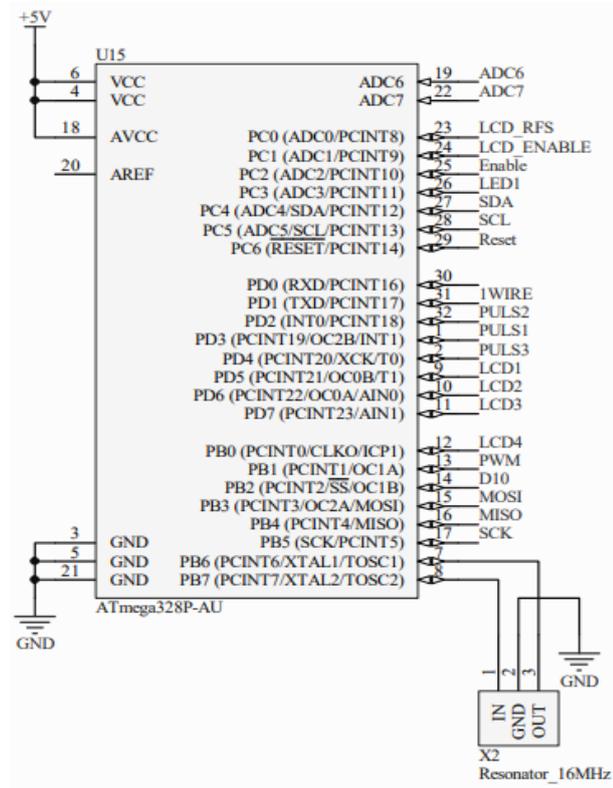


Figura 80. Microcontrolador ATmega328P.

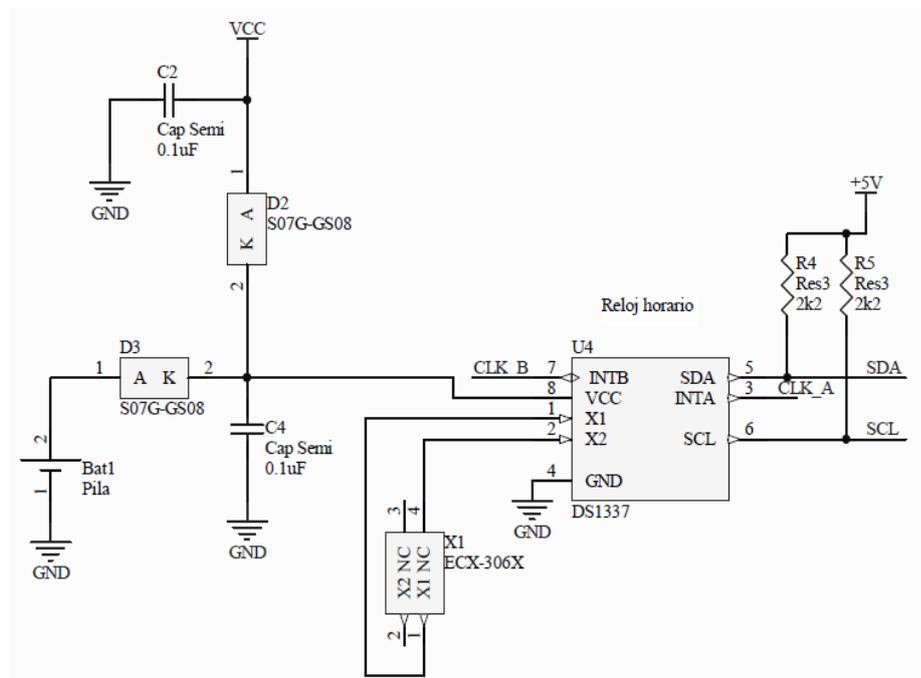


Figura 81. RTC DS1337.

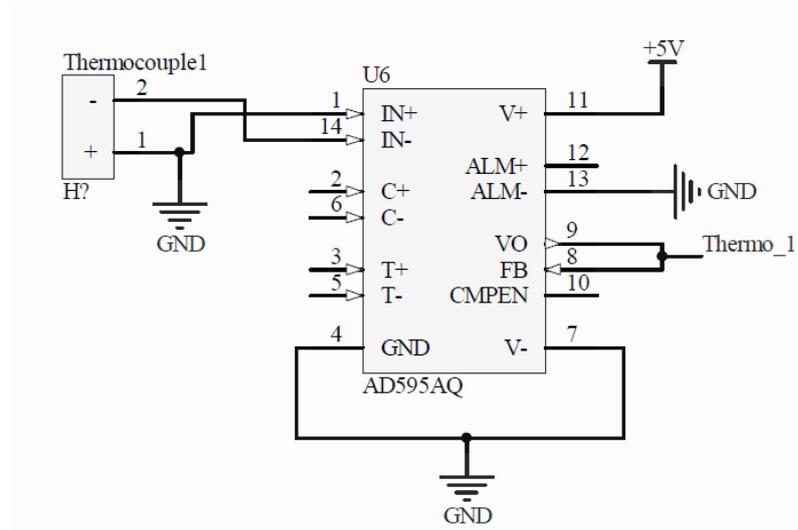


Figura 82. Amplificador AD595AQ.

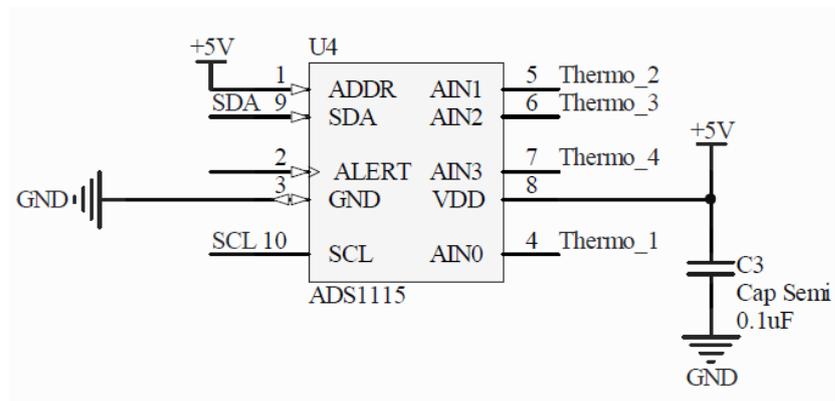


Figura 83. Conversor A/D ADS1115.

9.3 ANEXO III. Arduino

Arduino es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto (Open Source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar pues no requieren conocimientos avanzados de electrónica ni programación. Se trata de una poderosa herramienta tecnológica que se ha posicionado fuertemente, tanto en el ámbito industrial como académico. Arduino tiene muchas aplicaciones en automatización industrial, domótica, robótica, adquisición de datos, docencia, etc., siendo utilizado por profesores, ingenieros, investigadores y estudiantes.

El proyecto Arduino nació en el año 2005, en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea (Italia). Sus cinco creadores, entre los que figura un español, decidieron ponerle el nombre Arduino en honor al marqués de Ivrea que llegó a ser rey de Italia hacia el año 1002.

Arduino, además de ser el nombre que reciben las tarjetas microcontroladoras, es también el nombre que se le ha dado al entorno de desarrollo integrado y al lenguaje de programación.

Una tarjeta microcontroladora es una PCB en la que hay un microcontrolador, además de otros dispositivos electrónicos. Los microcontroladores son dispositivos programables que constan de un microprocesador o CPU, memoria y periféricos (timers, convertidor A/D, salidas PWM, bus I²C, bus SPI, etc.), todo ello en un único circuito integrado o chip.

Actualmente, ya se han fabricado y vendido en todo el mundo millones de placas Arduino. Este éxito y repercusión es debido a factores tan importantes como el fácil manejo y que se trata de un software y hardware abierto.

El concepto de software abierto (Open Source Software, OSS) implica disponer del código fuente del programa, posibilitando de esta manera su estudio, modificación y redistribución. Análogamente, el concepto de hardware abierto (Open Source Hardware, OSH) implica disponer de las especificaciones y los esquemas electrónicos de los componentes, por lo que los usuarios pueden hacer su propia versión, extendiéndola y mejorándola. En Arduino, el código fuente del entorno de programación y las librerías se han publicado, respectivamente, bajo las licencias GPL (General Public License) y LGPL (Lesser General Public License), mientras que toda la documentación y los ficheros de diseño de las placas Arduino están publicados bajo licencia CC (Creative Commons).

Las ventajas más relevantes de Arduino son las siguientes:

- **Coste reducido.** Las tarjetas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas basadas en microcontroladores.

- Multiplataforma. El software de Arduino puede ejecutarse en Windows, Linux y Mac. Otras plataformas están limitadas a ser programadas desde Windows.
- Entorno de programación sencillo y claro. El entorno de programación de Arduino es accesible para programadores no experimentados, pero suficientemente potente para usuarios avanzados.
- Software de código abierto. Por tanto, se dispone del código fuente.
- Hardware de código abierto. Así pues, están disponibles los planos de montaje.

Existe una gran variedad de placas Arduino, con distintas características. Los nombres de las placas con más éxito son UNO, LEONARDO, DUE, MEGA 2560, ZERO y PRO. Además, los pines de las placas Arduino pueden utilizarse para conectar otras placas, denominadas shields, que añaden más recursos hardware al sistema. Los shields son las placas de expansión de Arduino y se colocan en la parte superior de la placa Arduino, conectándose a ella mediante el acoplamiento de sus pines, sin necesidad de cables. Dependiendo del modelo, incluso se pueden apilar varios shields, unos encima de otros. Los nombres de los shields más vendidos son WIFI, ETHERNET, WIRELESS SD, MOTOR y GSM.

Arduino utiliza, en muchas de sus placas, microcontroladores de la serie AVR creados por la firma Atmel en el año 1996, y el microcontrolador utilizado (ATmega328P, ATmega2560...) varía según sea el modelo de placa.

El diseño hardware de Arduino está inspirado originariamente en el diseño de una placa de hardware libre preexistente, la placa Wiring. Esta placa fue desarrollada en el año 2003 por un estudiante del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea.

El entorno de programación Arduino, está basado en Processing, el cual a su vez se basa en Java. Este entorno de programación, también llamado entorno de desarrollo integrado o IDE (Integrated Development Environment) se compone de un editor de texto, un conjunto de librerías y las herramientas de compilación y programación necesarias. El IDE de Arduino se puede descargar gratuitamente de la página web de Arduino. Por otra parte, el lenguaje de programación Arduino está basado en Wiring, que a su vez se basa en C y C++.

Los ficheros generados por el IDE Arduino tienen extensión .ino y se les llama Sketchs. Son ficheros de texto que contienen el código fuente.

Las librerías son un conjunto de funciones agrupadas en un fichero. Arduino nos brinda la posibilidad de utilizar las librerías disponibles en la comunidad de Arduino o de escribir nuestras propias librerías, para hacer los programas más funcionales y flexibles. Las librerías

de Arduino tienen la extensión .h y se escriben al inicio del programa, precedidas de una almohadilla.

El compilador que utiliza Arduino es la variante de gcc para microcontroladores AVR. Este compilador parte del fichero .cpp obtenido por el preprocesador, el cual transforma el código fuente, escrito en lenguaje Arduino, a lenguaje C++, y genera un fichero de texto en formato Intel HEX, escrito en sistema hexadecimal y con extensión .hex. Posteriormente el linker une todos los ficheros generados y los ubica en las posiciones que ocuparán en la memoria. Para realizar la compilación y el linkado se utiliza el programa avr-g++ ([Lajara y Pelegrí, 2014](#)).

Así pues, la compilación genera un archivo con extensión .hex que contiene el código objeto, traducido al lenguaje máquina, listo para ser grabado en la memoria del microcontrolador ([Valdés y Pallàs, 2007](#)).

La estructura básica de los programas de Arduino está formada por dos funciones totalmente necesarias: setup() y loop(). La función setup() se invoca cuando se inicia el programa, y se usa para realizar la configuración inicial, como puede ser establecer el modo de trabajo de los pines, inicializar variables, indicar librerías o inicializar la comunicación serie. Esta función se ejecutará una sola vez, después de encender la placa Arduino o al resetearla. La función loop() es la función principal dentro del programa. Esta función se va a repetir continuamente de manera cíclica, ejecutando todas las instrucciones que se encuentren en su interior.

9.3.1 Arduino UNO

Arduino UNO, versión R3, es una tarjeta microcontroladora que utiliza el microcontrolador ATmega328P, con encapsulado de inserción en formato DIP (Dual In-line Package) con 28 pines (Figura 84).

Esta placa dispone también de un oscilador de cristal de cuarzo de 16 MHz de frecuencia, un conector USB, un conector de alimentación, un LED de encendido, un pulsador reset, un conjunto de pines, un regulador de tensión, un chip de interfaz USB y un conector ICSP.



Figura 84. Tarjeta Arduino UNO, versión R3.

Las características más importantes de la versión R3 del Arduino UNO figuran en la Tabla 62.

Tabla 62. Características de la tarjeta Arduino UNO, versión R3 (Fuente: [Arduino](#)).

Microcontrolador	ATmega328P en formato DIP con 28 pines
Memoria Flash	32 KB
Memoria SRAM	2 KB
Memoria EEPROM	1 kB
Pines totales	32
Canales PWM	6
Frecuencia de reloj	16 MHz
SPI	2
I ² C	1
USART	1
ADC: canales / resolución / velocidad	6 / 10 bits / 15 Kbps
Comparadores analógico	1
Timers	3 (2 de 8 bits y 1 de 16 bits)
Tensión de alimentación	7-12 V
Tensión de operación	5 V
Intensidad máxima para el pin de 3,3 V	50 mA
Intensidad máxima para los pines de I/O	40 mA
Rango de temperatura	-40 a 85 °C
Largo	68,6 mm
Ancho	53,4 mm
Peso	25 g

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

A continuación, se comentan los principales componentes y características de la versión R3 de la tarjeta Arduino UNO.

ATmega328P es un microcontrolador de la serie AVR, fabricado por la compañía americana Atmel, basado en la arquitectura Harvard modificada de 8 bits con tecnología RISC (Reduced Instruction Set Computer), es decir, con memorias separadas para programa y datos, y un conjunto de instrucciones simples para realizar la programación. En los microcontroladores AVR la memoria que aloja los datos (memoria SRAM y EEPROM) está separada de la memoria que aloja el programa (memoria Flash) por lo que ambas memorias se comunican con el microprocesador de forma totalmente independiente y en paralelo, consiguiendo una mayor velocidad y optimización.

El microcontrolador ATmega328P combina una memoria Flash, donde almacena el código del programa, una memoria SRAM, donde almacena las variables del programa y una memoria EEPROM para almacenar los datos no volátiles. Esta memoria Flash tiene unos 10000 ciclos de escritura mientras que la memoria EEPROM tiene unos 100.000 ciclos de escritura.

Además, el microcontrolador ATmega328P soporta comunicación serie tipo I²C, SPI y USART.

El bus de dos hilos con interfaz serie I²C (Inter-Integrated Circuit) es un estándar diseñado por la empresa Philips, específicamente para aplicaciones con microcontroladores, donde los dispositivos que se conecten, hasta un máximo de 128, pueden estar configurados como “maestros” o como “esclavos”. En este protocolo de comunicación la velocidad de transferencia de datos es de 100 Kbps en el modo estándar, y al haber una sola línea de datos, la transmisión de información es “half duplex”, es decir, la comunicación sólo puede establecerse en un sentido al mismo tiempo. Cada uno de los dos hilos, el que transmite la señal de datos y el que transmite la señal de reloj, deben unirse a la línea de alimentación mediante una resistencia “pull-up”. Este protocolo de comunicación se utiliza, por ejemplo, para comunicar el microcontrolador con un RTC (Real Time Clock) o con un sensor ([Lajara y Pelegrí, 2014](#)).

SPI se denomina interfaz serie para periféricos (Serial Peripheral Interface) y consiste en una transmisión de datos síncrona de cuatro hilos, punto a punto. Los dispositivos que se conecten pueden estar configurados como “maestros” o como “esclavos”. Al haber dos líneas de datos, la transmisión de información es “full duplex”, por tanto, la comunicación puede establecerse en los dos sentidos al mismo tiempo. Este protocolo de comunicación se utiliza, por ejemplo, para comunicar el microcontrolador con un programador o con una tarjeta de memoria SD.

El protocolo SPI es más rápido y consume menos energía que el I²C, pero consume más pines de la CPU que el protocolo I²C. Tanto el bus I²C como el bus SPI son dos estándares de comunicación utilizados para la transmisión de información entre circuitos integrados.

USART (Universal Synchronous and Asynchronous Serial Receiver and Transmitter) es un protocolo de comunicaciones serie muy versátil. Este protocolo se utiliza, por ejemplo, para comunicar el microcontrolador con un PC (ordenador personal), a través del puerto USB o del puerto RS-232.

El microcontrolador ATmega328P tiene un convertidor A/D, conocido en inglés por las siglas ADC (Analog-to-Digital Converter). El ADC tiene 6 canales, 10 bits de resolución y una velocidad de 15.000 bits por segundo.

El oscilador marca el ritmo de ejecución de las instrucciones en el microcontrolador, el ritmo de lectura y escritura de los datos en las memorias, el ritmo de adquisición de datos en los pines de entrada, el ritmo de envío de los datos hacia los pines de salida, etc. Arduino UNO posee un cristal de cuarzo que emite 16 millones de pulsos por segundo. Esta frecuencia de reloj de 16 MHz implica que el microcontrolador es capaz de realizar como mínimo 16 millones de instrucciones por segundo ([Torrente Artero, 2016](#)).

Por otro lado, la tarjeta Arduino UNO se puede alimentar desde el PC, a través del conector USB, y también con una fuente de alimentación o con una pila de 9 V, en ambos casos a través del conector de alimentación tipo jack.

El LED de encendido se ilumina cuando la tarjeta Arduino UNO es alimentada.

Para inicializar de nuevo el programa cargado en el microcontrolador de la tarjeta Arduino UNO se utiliza el pulsador de reset.

Cada pin de la placa tiene en la serigrafía el número correspondiente que lo identifica. En uno de los laterales de la tarjeta Arduino UNO están las 14 entradas/salidas digitales y cada uno de estos 14 pines se puede configurar como entrada o como salida. En el lateral opuesto se encuentran los 6 pines de las entradas analógicas y los pines de alimentación. Por otro lado, la tarjeta Arduino UNO no dispone de pines para salidas analógicas propiamente dichas, pero algunos pines de salida digital, en concreto los pines número 3, 5, 6, 9, 10 y 11 permiten “simular” un comportamiento analógico a través de señales PWM. Las siglas PWM provienen de Pulse Width Modulation, que se suele traducir por Modulación por Ancho de Pulso. Lo que hace este tipo de señal es emitir una onda cuadrada formada por pulsos de frecuencia constante, y al variar la duración de estos pulsos, se estará variando la tensión promedio resultante. La tarjeta Arduino UNO dispone de tres temporizadores o timers que mantienen la frecuencia constante de los pulsos emitidos.

Arduino UNO utiliza un regulador de tensión que proporciona una tensión de salida de 5 V.

De controlar la comunicación a través del puerto USB se encarga el chip de interfaz USB.

Por otra parte, Arduino UNO no necesita un hardware externo llamado programador, pues la placa ya trae pregrabado de fábrica un pequeño programa llamado bootloader, cuya función es recibir el programa y escribirlo en la memoria del microcontrolador, utilizando para ello un cable USB que comunica el PC con el microcontrolador. El bootloader del Arduino UNO, versión R3 ocupa 0,5 KB de los 32 KB de la memoria Flash y se llama Optiboot.

No obstante, es posible prescindir del programa bootloader y programar directamente el microcontrolador a través del puerto ICSP (In Circuit Serial Programming). En este caso será necesario utilizar un hardware programador que se conectará por un lado al puerto USB del PC y por el otro lado al conector ICSP de la tarjeta Arduino UNO. Es importante resaltar que, el propio Arduino UNO puede funcionar como programador de otras tarjetas Arduino UNO o de cualquier placa que tenga un microcontrolador ATmega328P.

9.4 ANEXO IV. Código fuente del programa del registrador de datos

```
//librerias necesarias

#include <Wire.h> //para el bus de comunicación I2C

#include <Adafruit_ADS1015.h> //para el conversor A/D

#include <LiquidCrystal.h> //para el display

#include <DS1337.h> //para el RTC

#include <SD.h> //para la tarjeta de memoria

#define WIRE_LIB_SCAN_MOD

#define tiempo_guardar 50

DS1337 RTC = DS1337();

Adafruit_ADS1115 ads(0x48);

Adafruit_ADS1115 ads_1(0x49);

File dataFile;

const int chipSelect = 10; //salida CS para la tarjeta SD

LiquidCrystal lcd(A0, A1, 5, 6, 7, 8); //patas donde está conectado el LCD

unsigned int count = 0; //contador para el display

unsigned int seleccion = 0; //selección de los sensores

unsigned int ahorro_bat=0;

char cambio=0;

void setup() {

    int i=0;

    int inicio=1;

    pinMode(9, OUTPUT);
```

```
pinMode(A2, OUTPUT);

lcd.begin(16, 2);

RTC.start();

RTC.time_is_set();

if (!SD.begin(chipSelect)) {

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("ERROR INICIO SD");

    while (1) ;

}

dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE); //crear o abrir el archivo datalog.csv

if (! dataFile) {

    lcd.print("ERROR ABRIR ARCHIVO");

    while (1);

}

dataFile.print("Date,Time"); //columnas de inicio para el log

for(i=0;i<8;i++)

{

    dataFile.print(",Sensor");

    dataFile.print(i+1);

}

dataFile.print(",");

dataFile.print("\n"); //salto de línea

dataFile.flush();

lcd.print("INICIANDO...");
```

```
RTC.readTime();

while(inicio){

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print("INICIANDO...");

    RTC.readTime();

    if( ( int(RTC.getSeconds())==0) || (int(RTC.getSeconds())%50==0)) inicio=0;

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print("Faltan: ");

    lcd.print(60 - int(RTC.getSeconds()));

    delay(100);

}

ahorro_bat=0;

ads.setGain(GAIN_TWO); //ganancia conversores AD

ads_1.setGain(GAIN_TWO);

TCCR2B = 0x00;    //Disbale Timer2 while we set it up

TCNT2 = 130;    //Reset Timer Count to 130 out of 255

TIFR2 = 0x00;    //Timer2 INT Flag Reg: Clear Timer Overflow Flag

TIMSK2 = 0x01;    //Timer2 INT Reg: Timer2 Overflow Interrupt Enable

TCCR2A = 0x00;    //Timer2 Control Reg A: Wave Gen Mode normal

TCCR2B = 0x05;    //Timer2 Control Reg B: Timer Prescaler set to 128

ads.begin();

ads_1.begin();

lcd.clear();
```

```
}  
  
ISR(TIMER2_OVF_vect) { //interrupción timer2 10ms  
  
    count++;  
  
    if(count > 999){ //1 segundo  
  
        count = 0;  
  
        seleccion++;  
  
        ahorro_bat++;  
  
    }  
  
    if(seleccion > 7) seleccion=0;  
  
    TCNT2 = 130;  
  
    TIFR2 = 0x00;  
  
}  
  
unsigned long media_suma=0;  
  
unsigned long media[20];  
  
int cont_media=0;  
  
void loop() {  
  
    int tiempo=1;  
  
    float sensor_media=0;  
  
    int i=0;  
  
    int16_t adc00, adc01, adc02, adc03,adc10,adc11,adc12,adc13; //variables ADC  
  
    float constante=0.00625; //constante ADC  
  
    //lecturas conversor ADC  
  
    adc10 = ads.readADC_SingleEnded(0); //5  
  
    adc12 = ads.readADC_SingleEnded(1); //7
```

```
adc13 = ads.readADC_SingleEnded(2); //6
adc11 = ads.readADC_SingleEnded(3); //8
adc00 = ads_1.readADC_SingleEnded(0); //1
adc02 = ads_1.readADC_SingleEnded(1); //3
adc03 = ads_1.readADC_SingleEnded(2); //2
adc01 = ads_1.readADC_SingleEnded(3); //4
media[cont_media]=adc00;
for(i=0;i<20;i++) media_suma = media[i] + media_suma;
sensor_media= media_suma*0.05;
media_suma=0;
lcd.setCursor(0, 0);
//muestra por LCD los diferentes sensores
switch(seleccion){
    case 0:
        lcd.print("S1 ");
        lcd.print(sensor_media*constante,3);
        break;
    case 1:
        lcd.print("S2 ");
        lcd.print(adc01*constante,3);
        break;
    case 2:
        lcd.print("S3 ");
        lcd.print(adc02*constante,3);
```

```
        break;
    case 3:
        lcd.print("S4 ");
        lcd.print(adc03*constante,3);
        break;
    case 4:
        lcd.print("S5 ");
        lcd.print(adc10*constante,3);
        break;
    case 5:
        lcd.print("S6 ");
        lcd.print(adc11*constante,3);
        break;
    case 6:
        lcd.print("S7 ");
        lcd.print(adc12*constante,3);
        break;
    case 7:
        lcd.print("S8 ");
        lcd.print(adc13*constante,3);
        break;
    defalut:
        lcd.print("ALGO");
        break;
```

```
}  
  
if(ahorro_bat>tiempo_guardar-2){  
  
    lcd.clear();  
  
    lcd.setCursor(0, 1);  
  
    RTC.readTime();  
  
    while(tiempo){  
  
        RTC.readTime();  
  
        if( ( int(RTC.getSeconds())==0) || (int(RTC.getSeconds())%50==0)) tiempo=0;  
        lcd.setCursor(0, 1);  
  
        lcd.print("Esperando...");  
  
        }  
  
        dataFile.print(int(RTC.getDays())); dataFile.print("/");  
  
        dataFile.print(int(RTC.getMonths())); dataFile.print("/");  
  
        dataFile.print(int(RTC.getYears())); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(int(RTC.getHours())); dataFile.print(":");  
  
        dataFile.print(int(RTC.getMinutes())); dataFile.print(":");  
  
        dataFile.print(int(RTC.getSeconds())); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(sensor_media*constante,3); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(adc01*constante,3); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(adc02*constante,3); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(adc03*constante,3); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(adc10*constante,3); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(adc11*constante,3); dataFile.print(",");  
  
        dataFile.print(adc12*constante,3); dataFile.print(",");
```

```
dataFile.print(adc13*constante,3); dataFile.print(",");  
dataFile.flush();  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(int(RTC.getHours())); lcd.print(":");  
lcd.print(int(RTC.getMinutes())); lcd.print(":");  
lcd.print(int(RTC.getSeconds()));  
ahorro_bat=0;  
tiempo=1;  
}  
cont_media++;  
if(cont_media > 20) cont_media=0;  
}
```

9.5 ANEXO V. Equipo Shotherm QTM-F1

Se trata de un equipo comercial para la medida de la conductividad térmica de materiales en estado sólido. Este equipo ha sido fabricado por la compañía japonesa Showa Denko K.K.

Shotherm QTM-F1 está equipado con un horno eléctrico, siendo así un equipo adecuado para obtener la conductividad térmica de materiales refractarios. No obstante, también se pueden realizar mediciones a temperatura ambiente, simplemente no conectando el horno. A su vez, las muestras pueden tener forma de paralelepípedo rectangular, o bien pueden ser materiales disgregados que irán debidamente confinado en sendos moldes. En cualquier caso, las dos probetas deben ser del mismo material y las mismas dimensiones.

Según [Llavona \(1995d\)](#) el medidor Shotherm QTM-F1 consta de los siguientes componentes:

- Unidad aritmética. Esta unidad consta de tres selectores: el primero fija la intensidad eléctrica que se suministra al hilo, el segundo selecciona la posición de calibrado o lectura y el último permite el ajuste del cero antes de realizar una medida o un calibrado. Esta unidad también contiene dos botones (START Y RESET), un pequeño piloto de color naranja y un termómetro diferencial que permite conocer el incremento de la temperatura cuando se está realizando una medida, también dispone de un selector mediante el cual se puede introducir el valor de la distancia correspondiente a la medida del voltaje. Además, es esta unidad la que incorpora el microprocesador que realiza todos los cálculos y la que, a través de un display de 4 dígitos, muestra los valores de la conductividad térmica de la muestra y temperatura a la que se ha realizado la medida.
- Unidad fuente de potencia. Esta unidad dispone de un amperímetro en donde se muestra la intensidad eléctrica que se suministra al hilo de calentamiento en el rango 0-3 A. También dispone del interruptor de encendido, de un pequeño piloto de color rojo y de un fusible.
- Unidad de control de potencia del horno. Esta unidad permite regular la temperatura que debe alcanzar el horno para realizar la medida de conductividad térmica a una temperatura determinada.
- Horno. Se trata de un horno eléctrico dentro del cual se introducen las muestras y, por tanto, donde está instalado el elemento de medida. Para realizar medidas de conductividad térmica a temperatura ambiente puede estar la tapa del horno abierta.

En la Figura 85 se muestra una vista general del equipo Shotherm QTM-F1 con los cuatro componentes citados.



Figura 85. Componentes del equipo Shotherm QTM-F1.

En la Figura 86 puede verse la disposición en planta de la probeta inferior colocada en el elemento de medida, el cual está formado por el hilo de calentamiento, el hilo de medida del voltaje y el termopar.

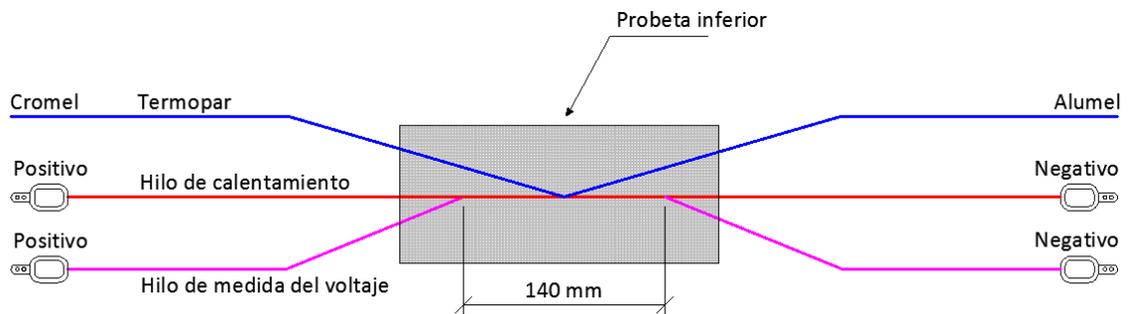


Figura 86. Vista en planta de la probeta inferior y el elemento de medida.

El hilo de calentamiento y el hilo de medida del voltaje tienen un terminal positivo y un terminal negativo, polaridad que hay que tener en cuenta cuando el elemento de medida se rompe y hay que sustituirlo por otro. Para realizar un ensayo de conductividad térmica con este equipo se necesitan dos probetas iguales, dispuestas de forma que los tres componentes del elemento de medida se emplazan entre las dos probetas. Cuando para la realización de la medida se emplea el horno eléctrico, es necesario utilizar un accesorio, consistente en una tubería de aislamiento que protege al termopar de las altas temperaturas.

Las especificaciones técnicas del equipo Shotherm QTM-F1 se indican en la Tabla 63.

Tabla 63. Especificaciones técnicas (Fuente: [Manual del equipo Shotherm QTM-F1](#)).

Método de medida de la conductividad térmica	THW
País de fabricación	Japón
Rango de medida de la conductividad térmica	0-15 kcal/(m· h·°C)
Rango de temperatura	0-900 °C
Exactitud	5 %
Precisión	3 %
Display	7 segmentos con 4 dígitos
Tiempo de medida	2 min
Tiempo de estabilización	45 min
Alimentación de la unidad de fuente de potencia	Corriente alterna de 100 V a 50/60 Hz
Unidades de la conductividad térmica	kcal/(m· h·°C)
Unidades de la temperatura de medida	°C
Material del hilo de calentamiento	Nicromo
Longitud del hilo de calentamiento	600 mm
Anchura del hilo de calentamiento	1,2 mm
Espesor del hilo de calentamiento	0,1 mm
Resistencia eléctrica del hilo de calentamiento	8 Ω
Amperaje en el hilo de calentamiento	0,25-2,83 A
Potencia en el hilo de calentamiento	20-80 W
Material del hilo de medida del voltaje	Nicromo
Distancia correspondiente a la medida del voltaje	140 mm
Sensor de temperatura	Termopar tipo K (cromel-alumel)
Longitud del termopar	320 mm
Anchura del termopar	0,5 mm
Espesor del termopar	0,1 mm
Alimentación del horno	Corriente alterna de 200 V a 50/60 Hz
Temperatura máxima del horno	1.000 °C
Potencia máxima consumida por el horno	6 kW
Longitud del horno	150 mm
Anchura del horno	300 mm
Altura del horno	150 mm
Temperatura ambiente	0-40 °C
Humedad relativa del ambiente	20-70 %
Peso del equipo	330 kg

Para realizar los ensayos en el equipo Shotherm QTM-F1, dependiendo de la conductividad térmica de la muestra, se debe seleccionar una intensidad eléctrica de salida (Tabla 64) y además las muestras deben tener unas dimensiones mínimas (Tabla 65).

Tabla 64. Intensidad eléctrica de salida (Fuente: [Manual del equipo Shotherm QTM-F1](#)).

Conductividad térmica [kcal/h·m·°C]	Intensidad eléctrica de salida [A ²]
< 0,1	0,25
0,1 - 0,2	0,5
0,2 - 0,4	1
0,4 - 0,8	2
0,8 - 1,5	4
≥ 1,5	8

Tabla 65. Tamaño mínimo de las muestras (Fuente: [Manual del equipo Shotherm QTM-F1](#)).

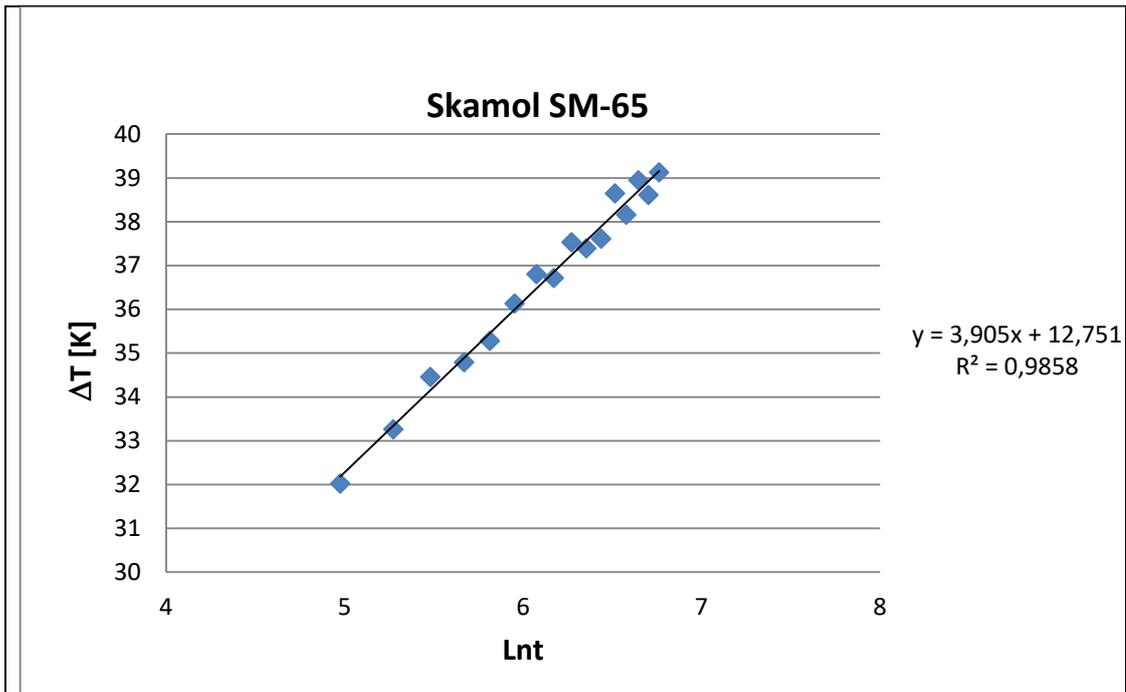
Conductividad térmica [kcal/h·m·°C]	Tamaño mínimo de las muestras [mm]
0,1	150 x 12 x 6
0,5	150 x 30 x 15
1,0	150 x 40 x 20
2,0	150 x 60 x 26
3,0	150 x 65 x 32

9.6 ANEXO VI. Ensayos realizados durante la validación del equipo MCT

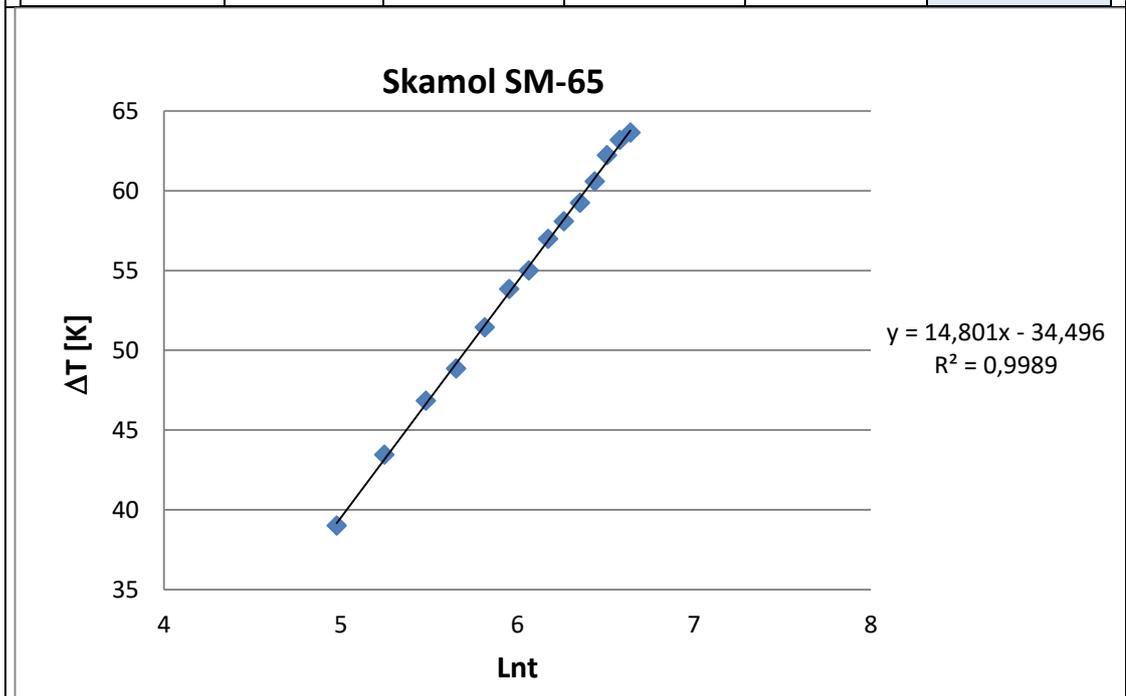
Como se indica en el cuerpo de la tesis se han hecho 32 ensayos para determinar el tamaño mínimo de la muestra y la intensidad eléctrica apropiada, aplicando 4 intensidades eléctricas sobre 4 muestras-patrón con diferentes tamaños. Igualmente, se han realizado 6 ensayos para estudiar la influencia que tiene la realización de una ranura y el relleno de esta, aplicando 3 intensidades eléctricas sobre la muestra-patrón Macizo M5R de 180 mm x 70 mm x 50 mm.

A continuación, pueden verse las 38 fichas realizadas, una por cada ensayo. En ellas se muestra la gráfica correspondiente a la recta de regresión (tramo recto de la curva de calentamiento), con su ecuación matemática y el coeficiente de determinación (R^2). También se indican los siguientes valores:

- ✓ El tamaño de la muestra-patrón.
- ✓ La intensidad eléctrica aplicada (I).
- ✓ La diferencia de potencial en el hilo de calentamiento (ΔV).
- ✓ La longitud del hilo de calentamiento (L).
- ✓ La pendiente de la recta de regresión (m).
- ✓ La conductividad térmica (λ_{exp}).

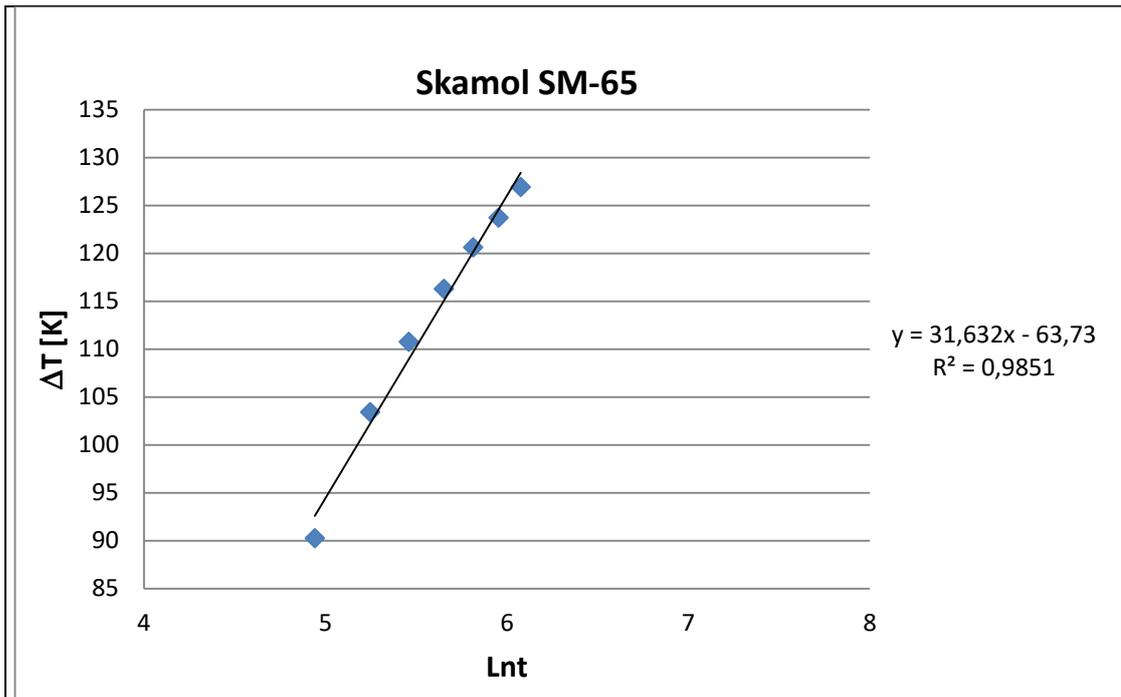


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	0,5	1,36	0,11	3,905	0,13

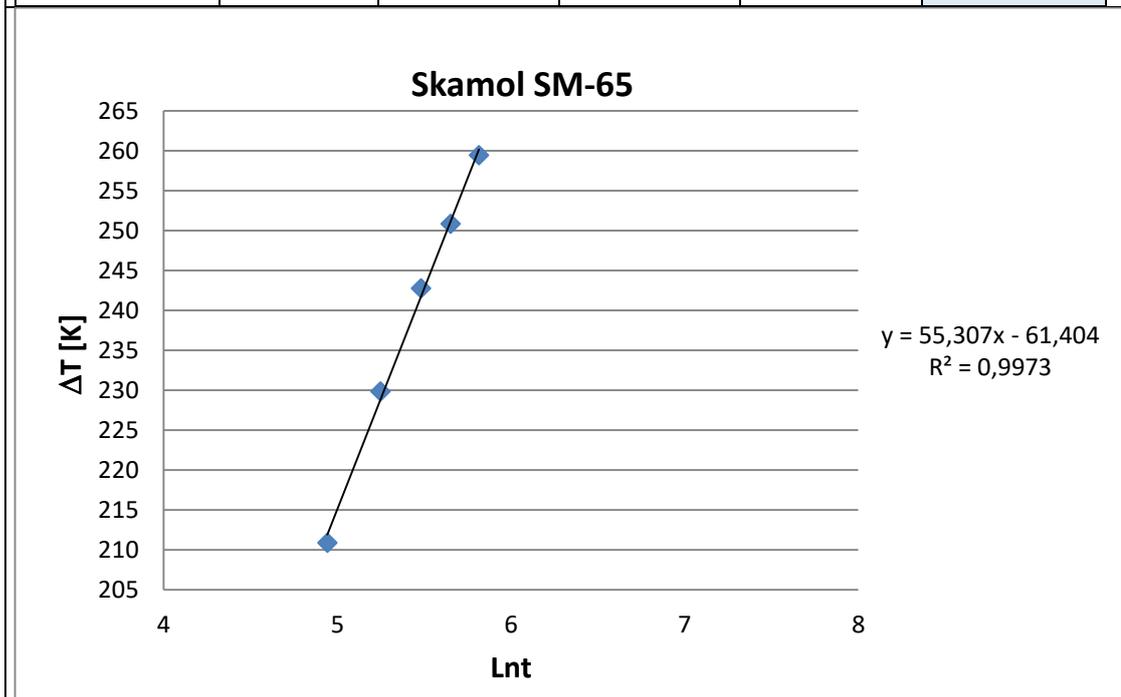


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	1	2,75	0,11	14,801	0,13

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

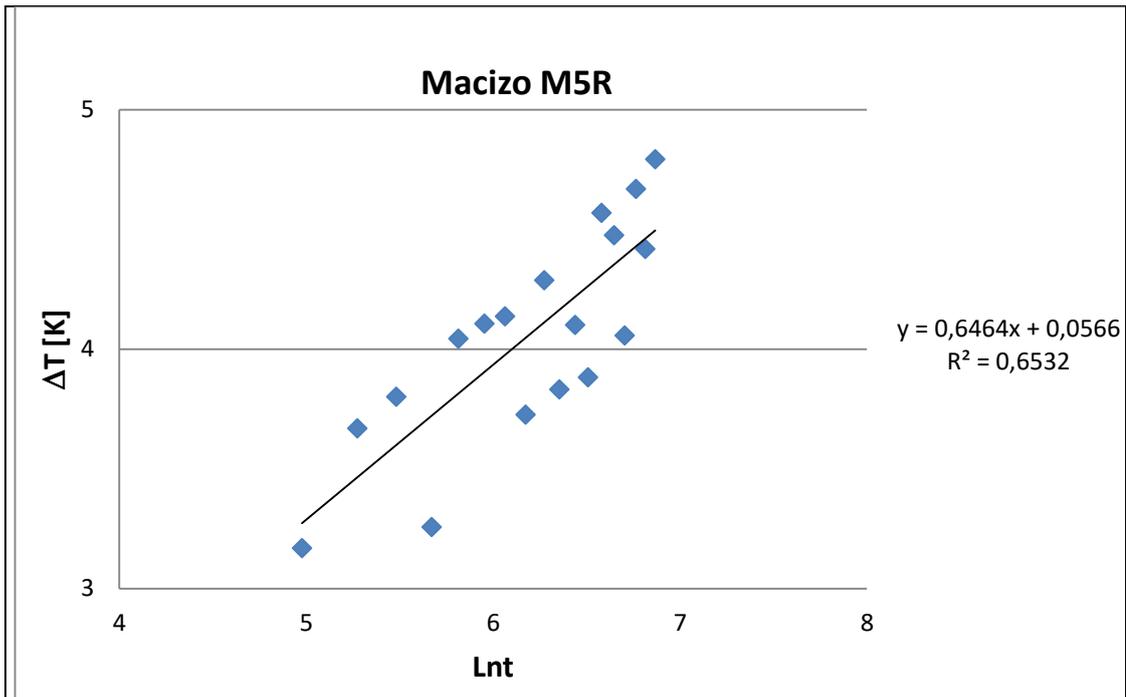


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	1,5	4,12	0,11	31,632	0,14

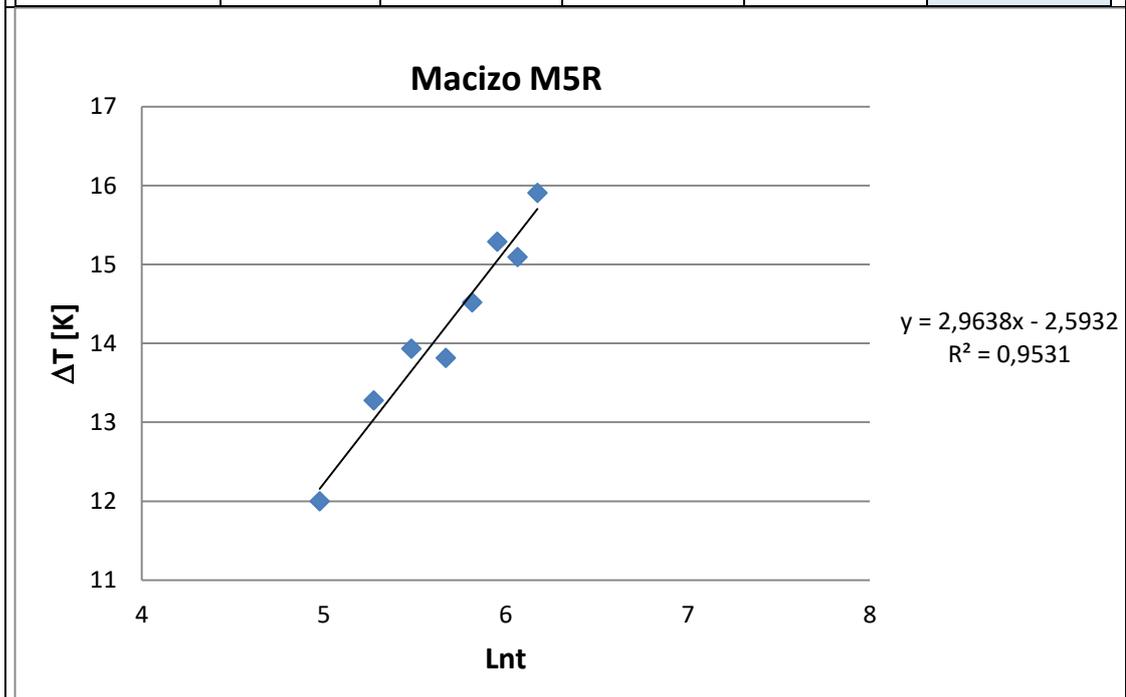


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	2	5,51	0,11	55,307	0,14

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

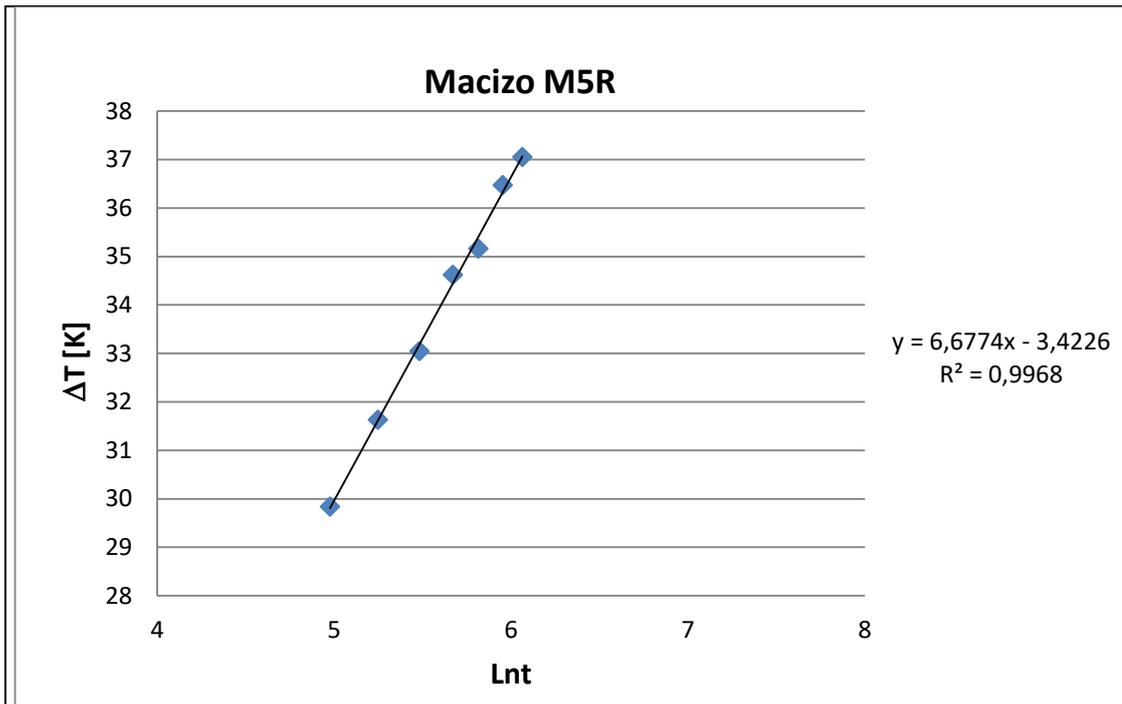


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	0,5	1,35	0,11	0,6464	0,75

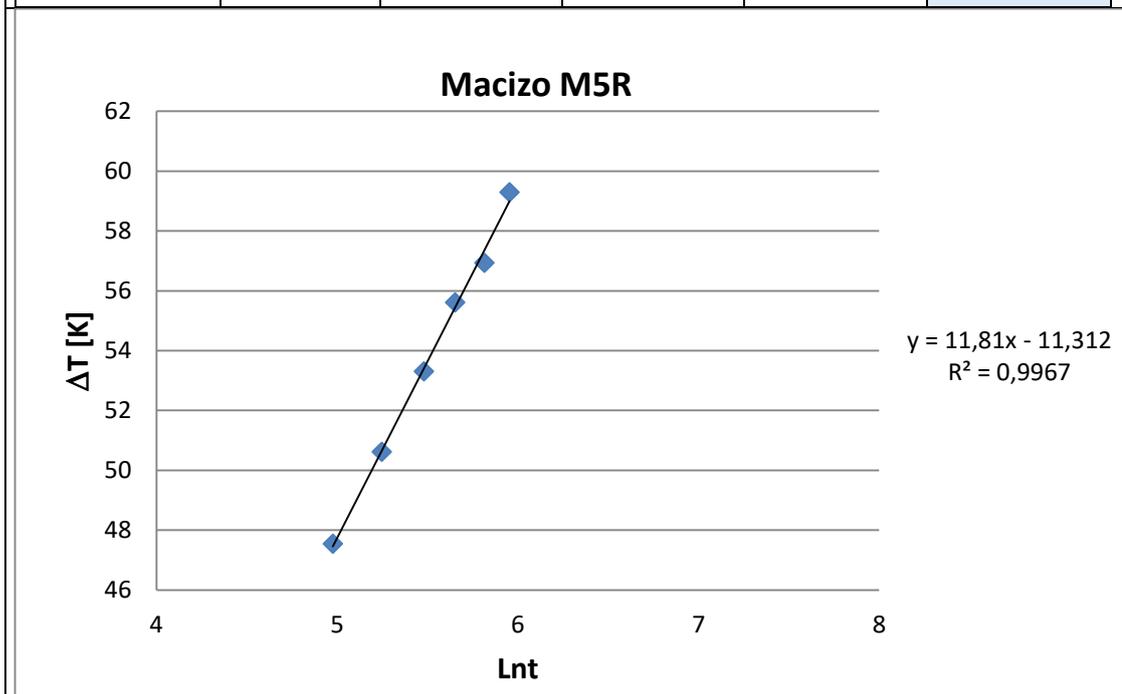


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	1	2,77	0,11	2,9638	0,68

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

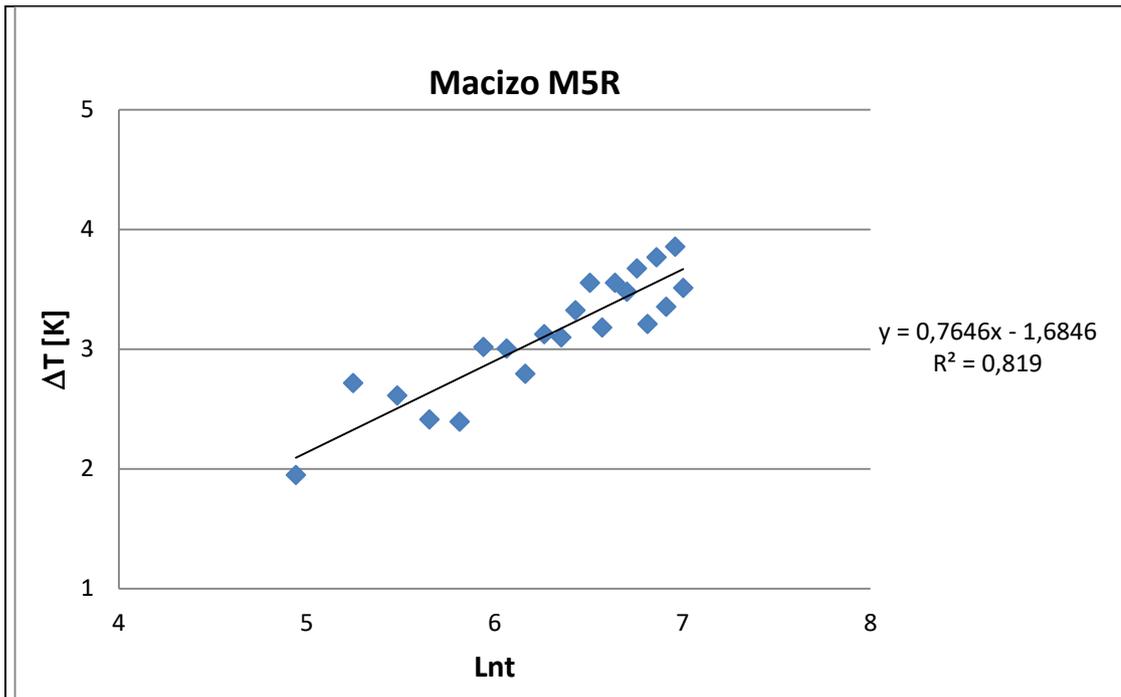


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	1,5	4,11	0,11	6,6774	0,67

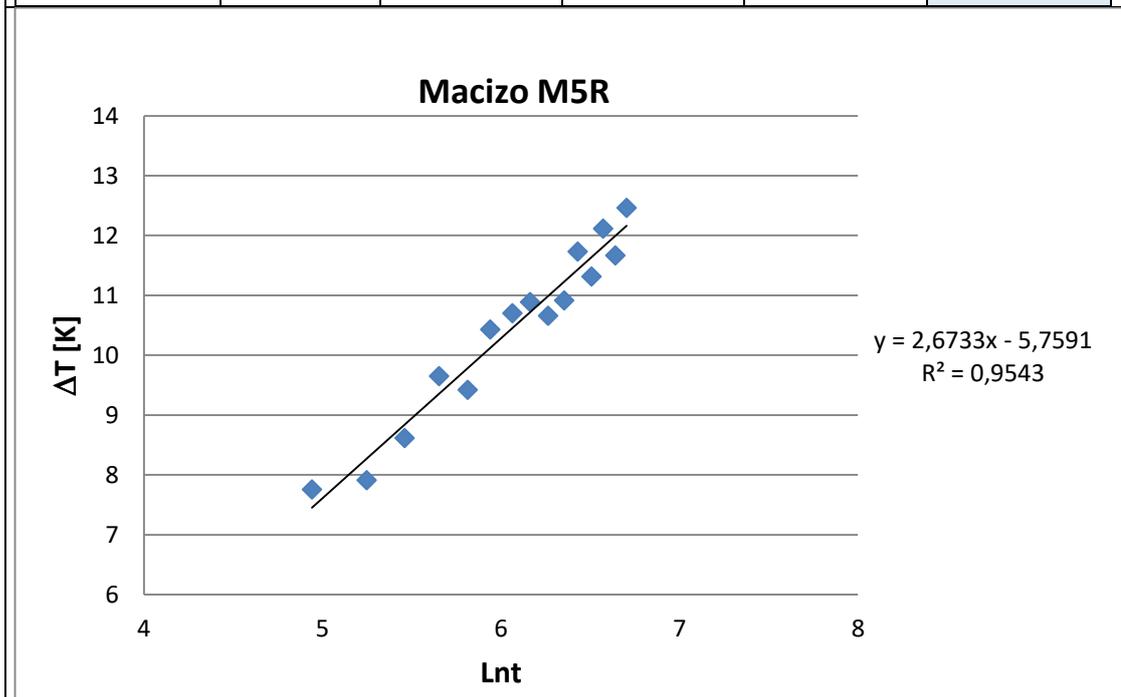


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	2	5,51	0,11	11,81	0,67

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

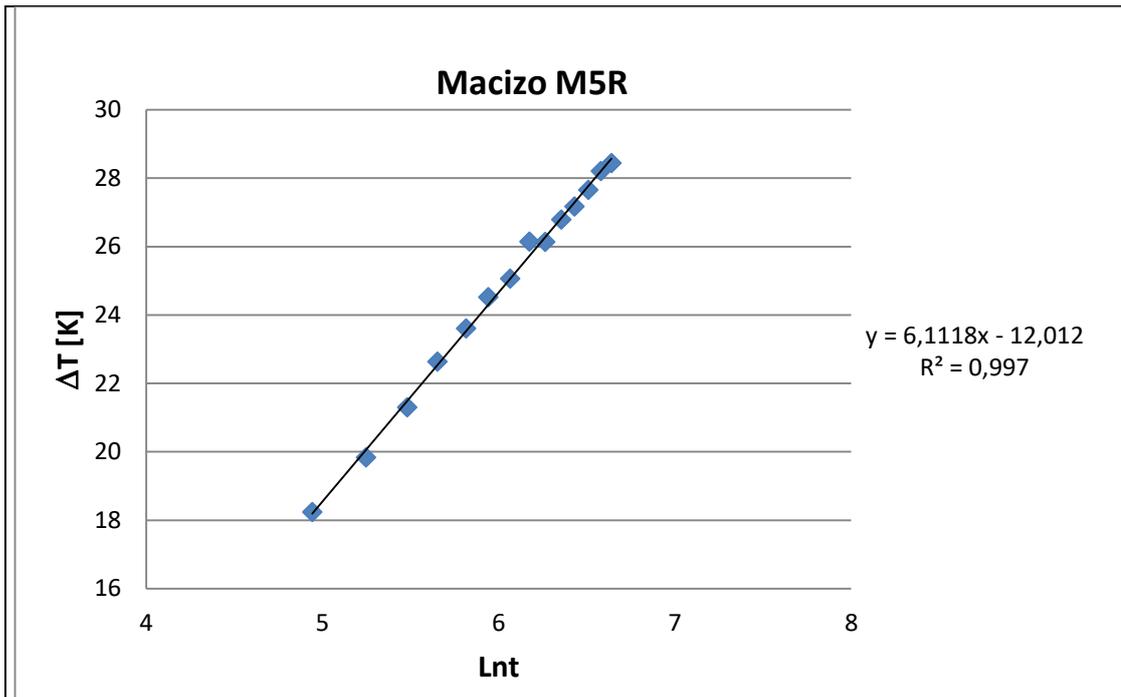


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	0,5	2,21	0,18	0,7646	0,64

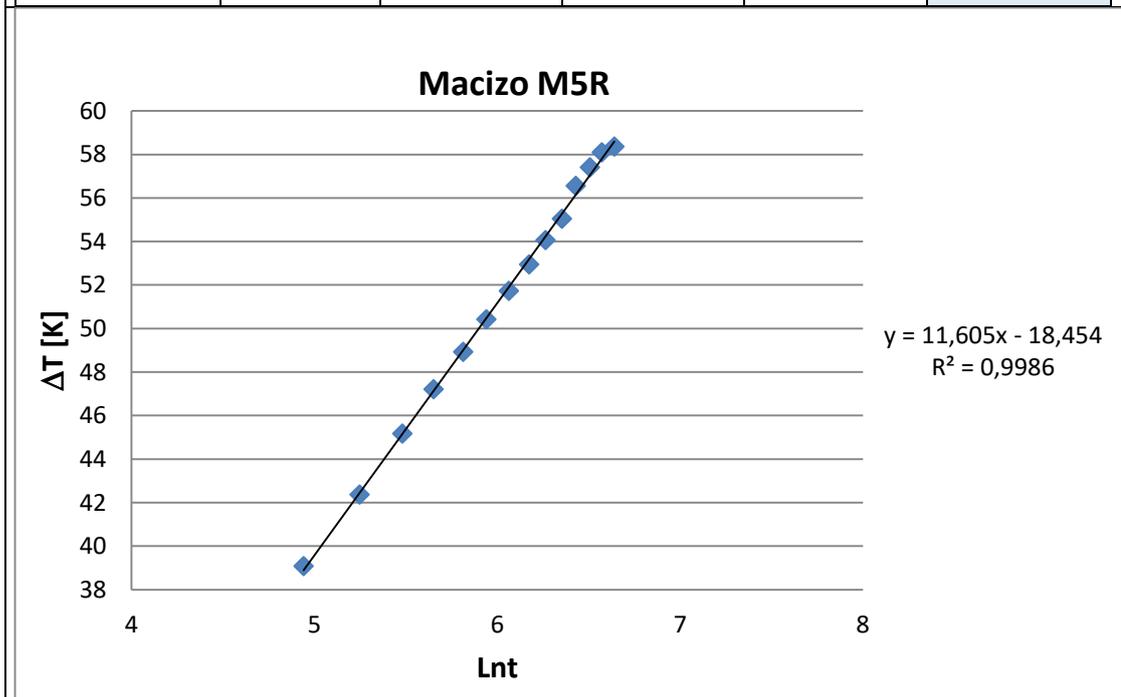


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1	4,53	0,18	2,6733	0,75

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

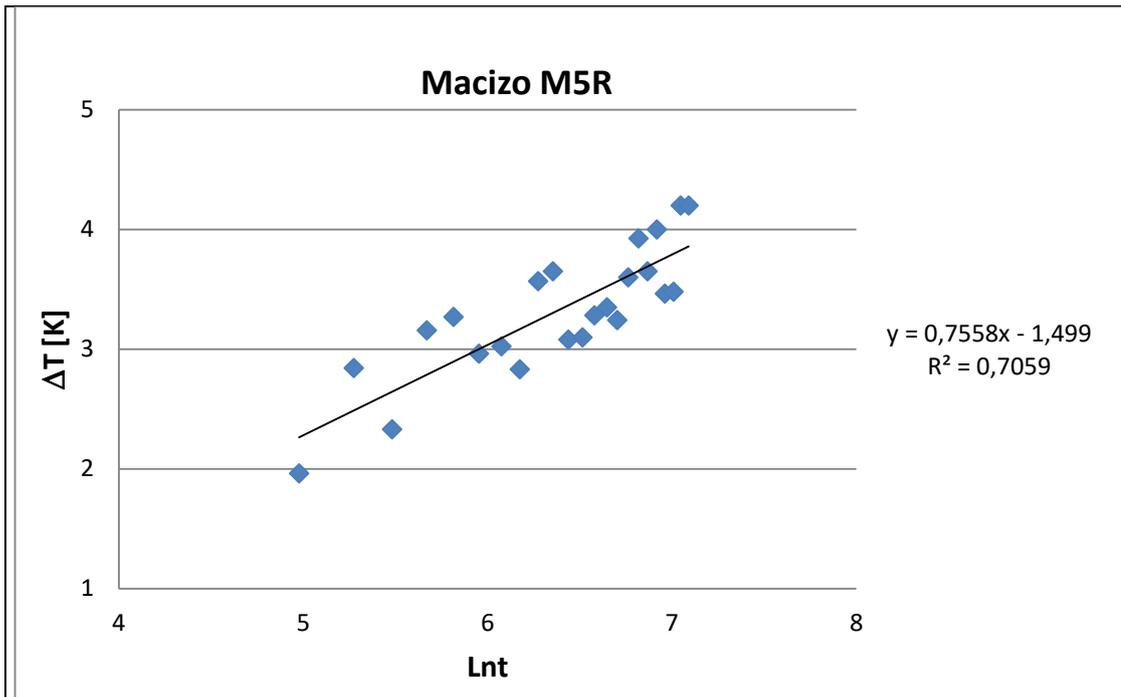


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1,5	6,74	0,18	6,1118	0,73

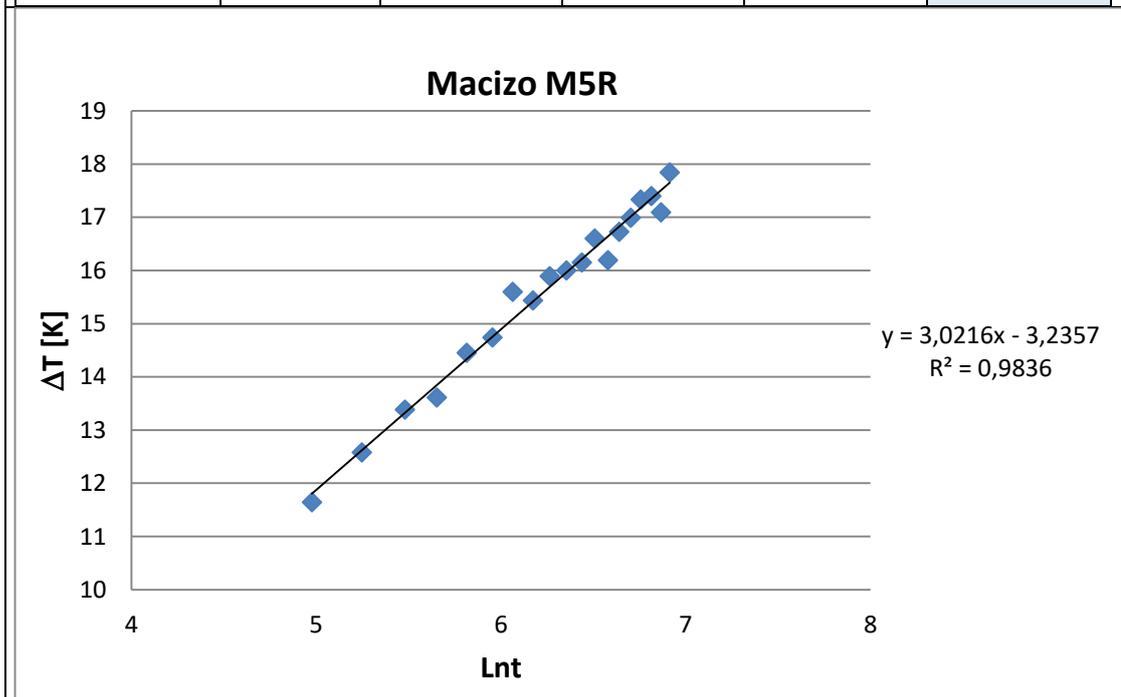


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	2	9,01	0,18	11,605	0,69

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

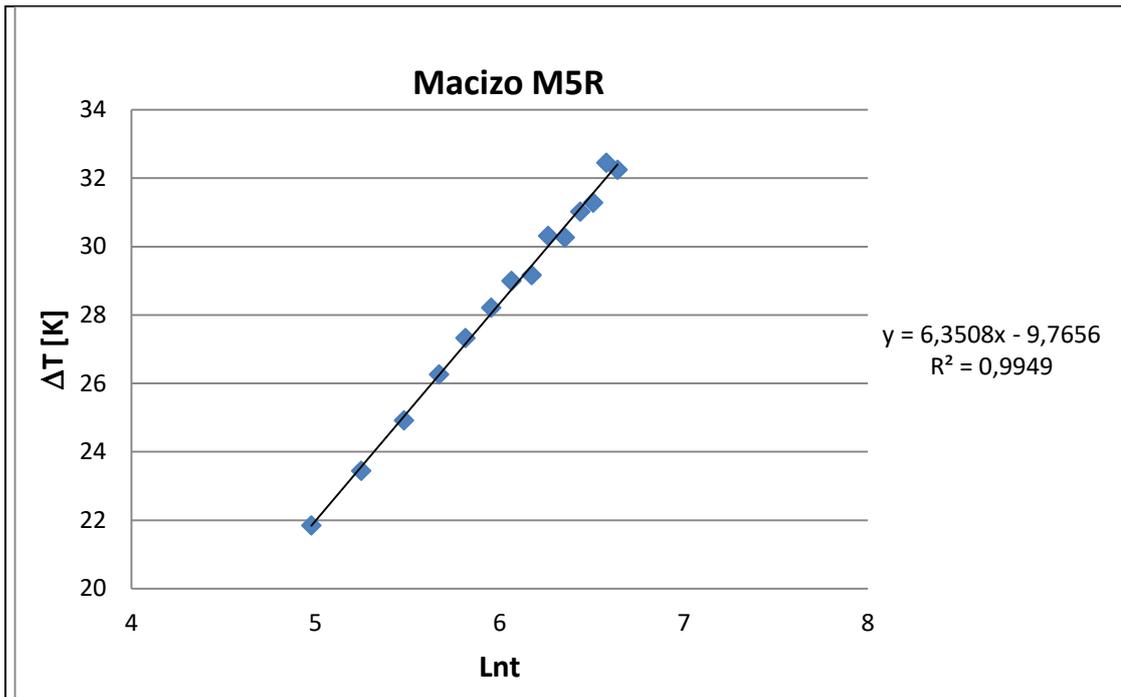


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	0,5	2,97	0,24	0,7558	0,65

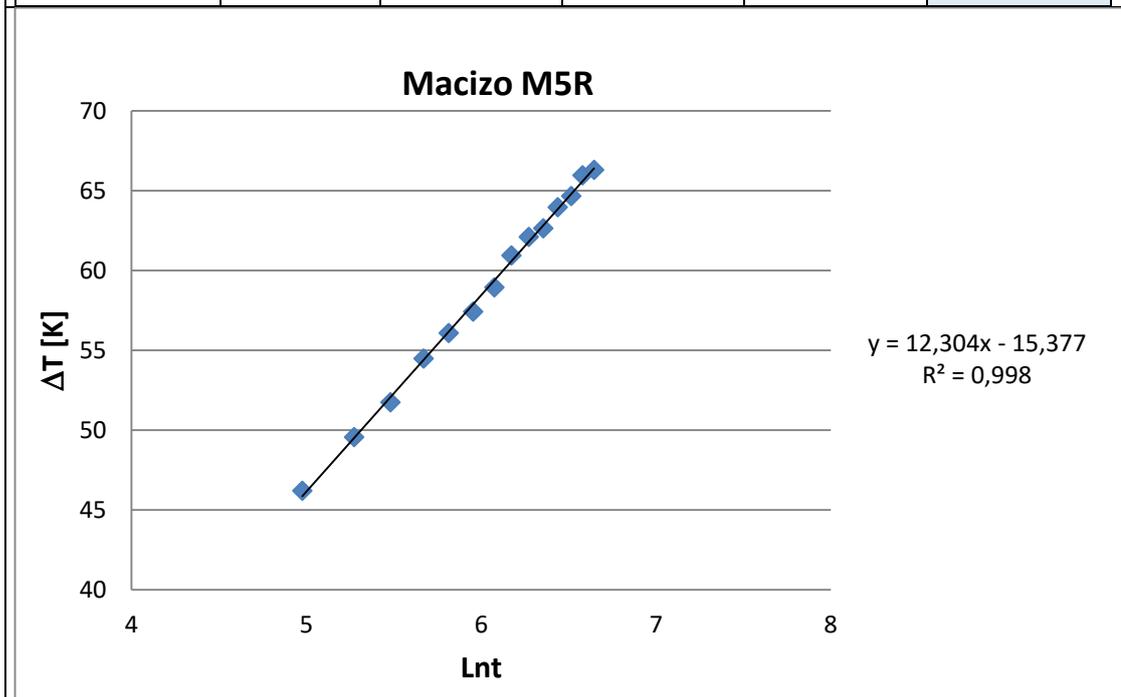


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	1	6,04	0,24	3,0216	0,66

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

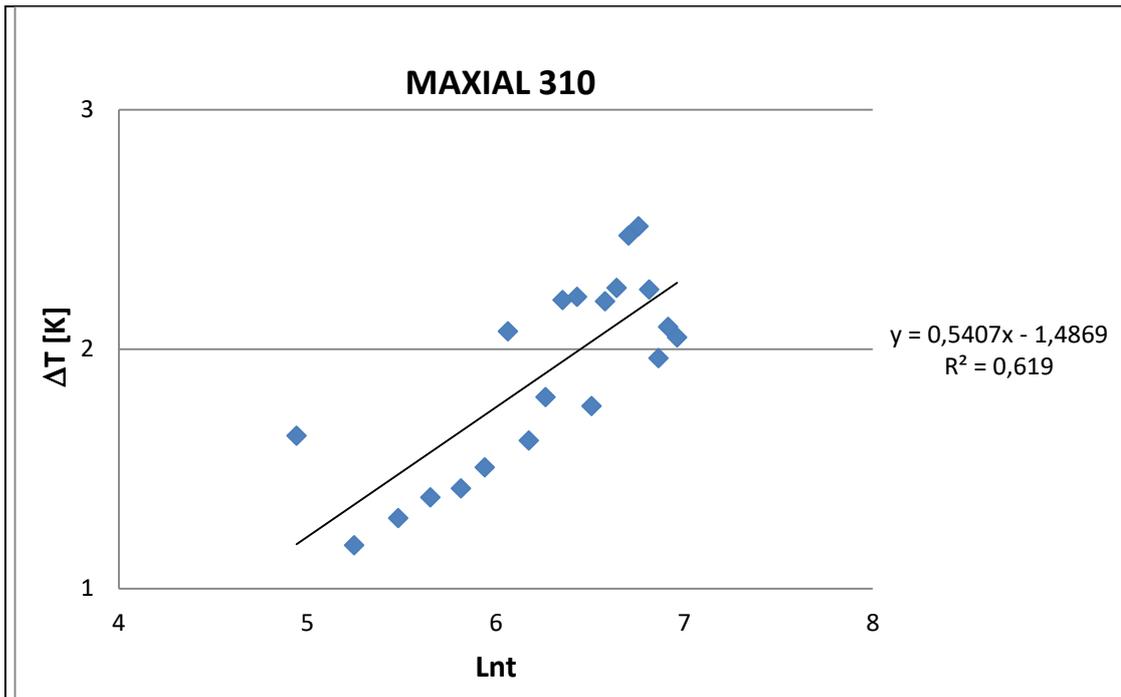


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	1,5	8,99	0,24	6,3508	0,70

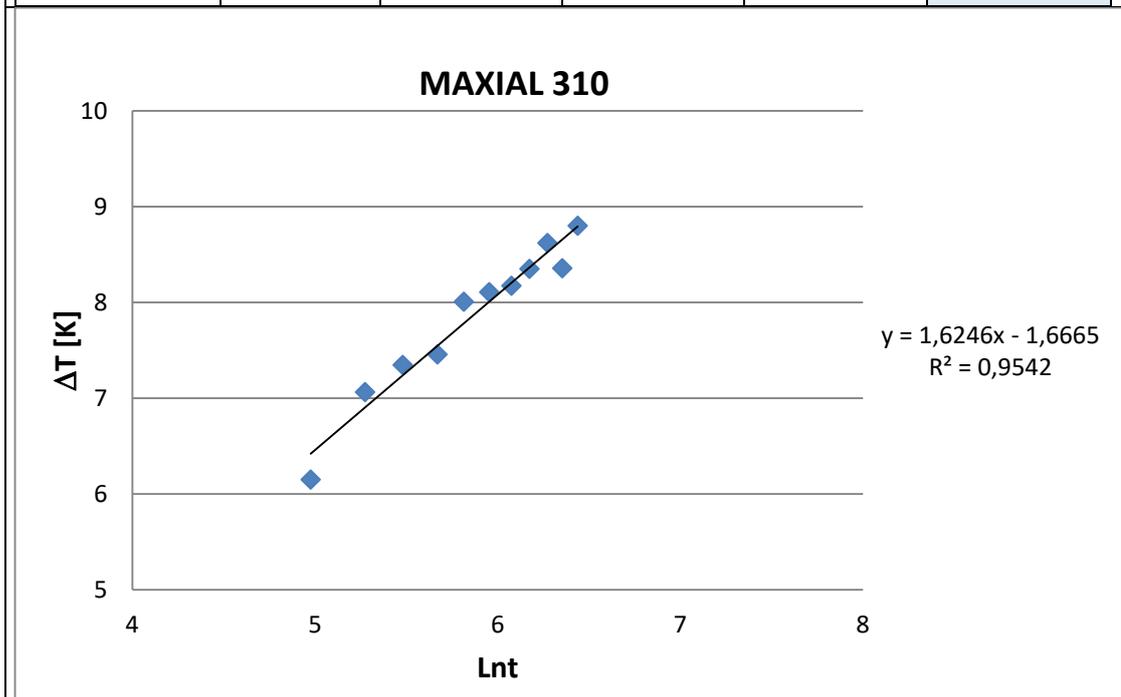


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	2	12,03	0,25	12,304	0,65

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

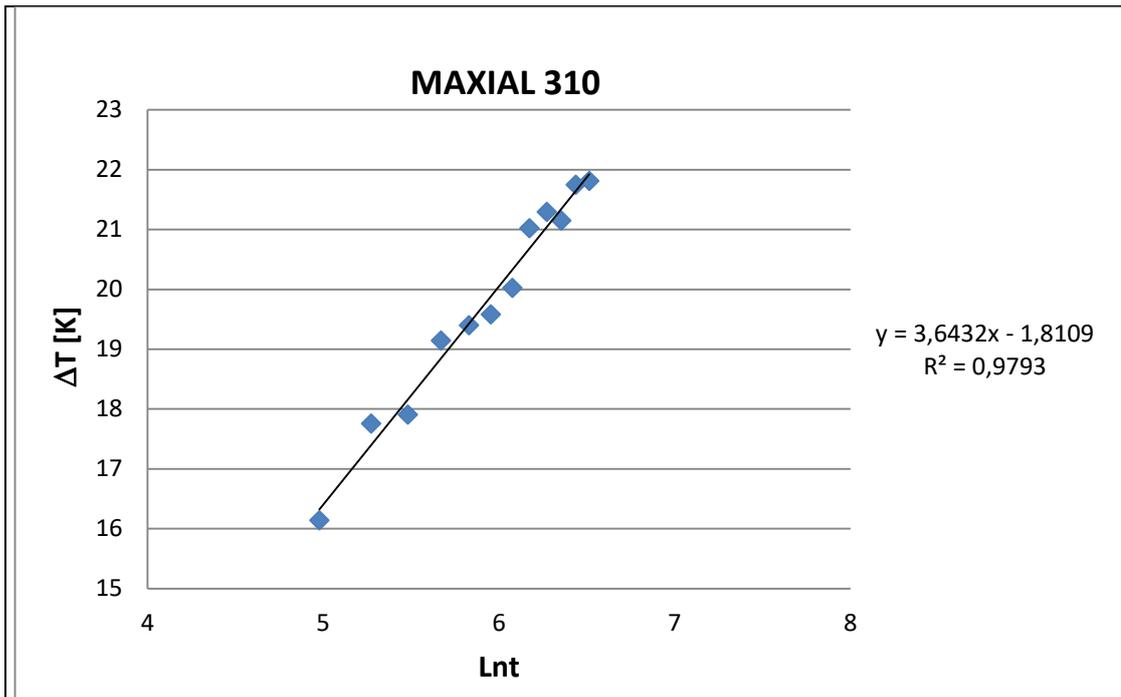


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	0,5	2,21	0,18	0,5407	0,90

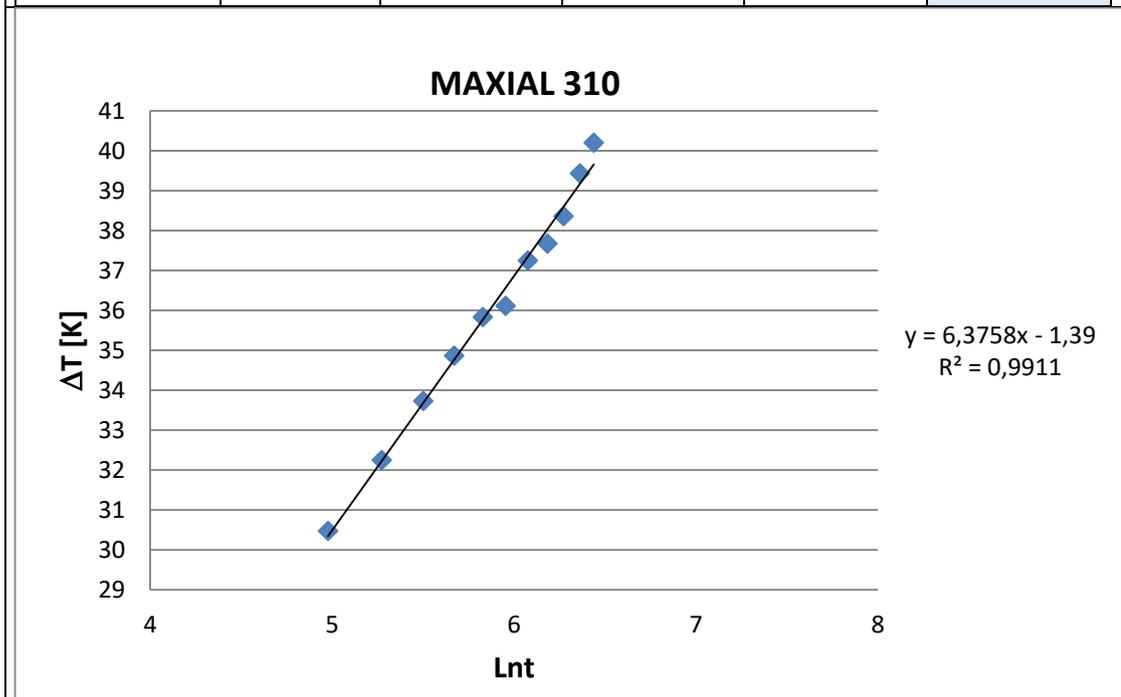


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1	4,53	0,18	1,6246	1,23

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

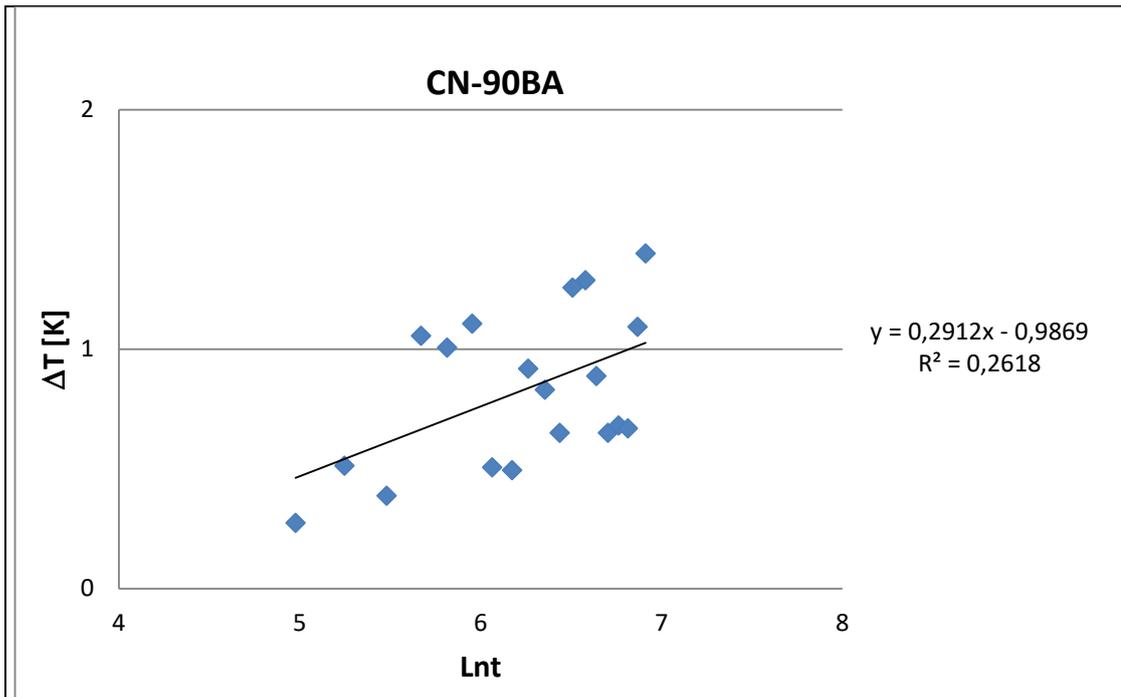


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1,5	6,74	0,18	3,6432	1,23

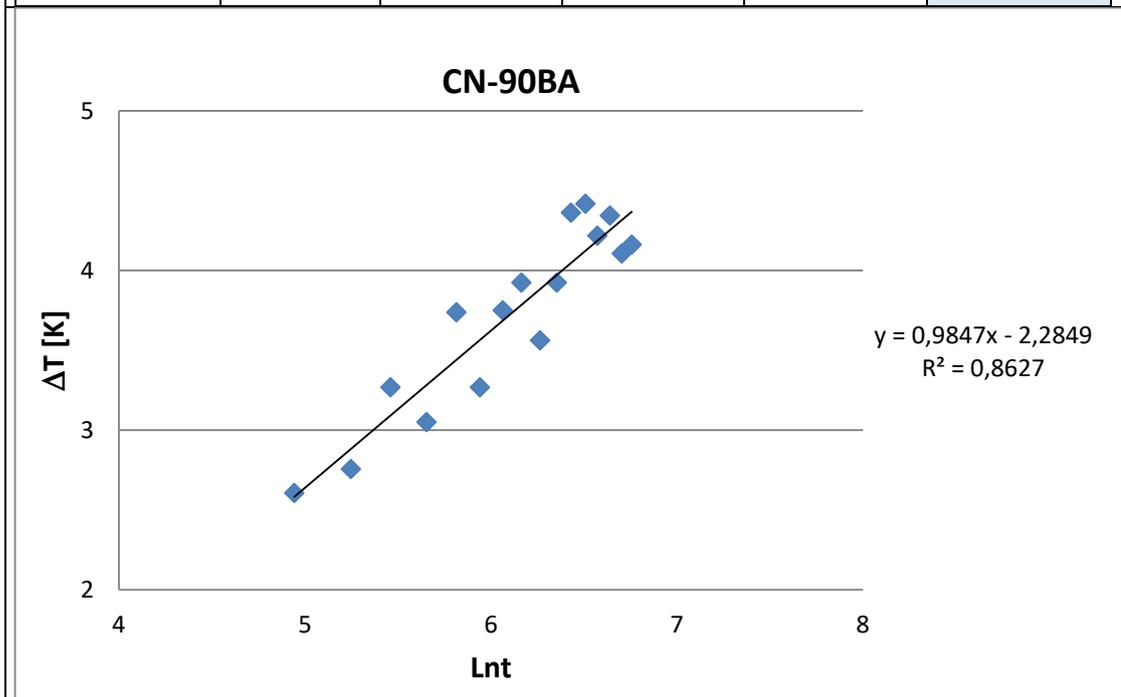


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	2	9,01	0,18	6,3758	1,25

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

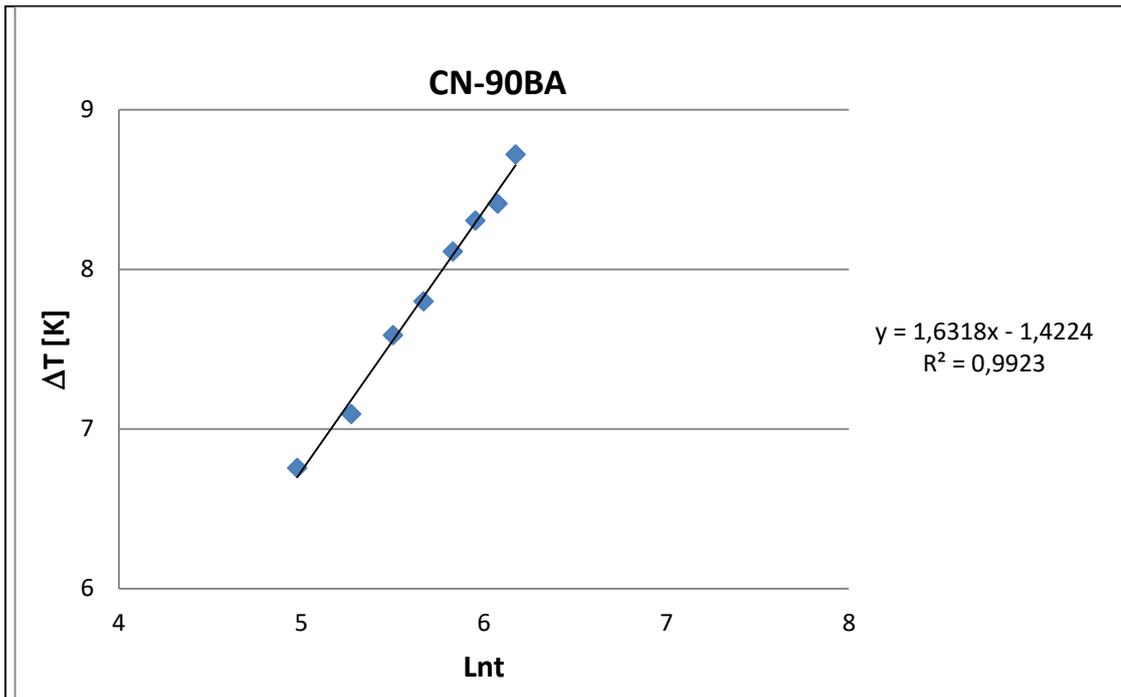


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	0,5	1,34	0,11	0,2912	1,67

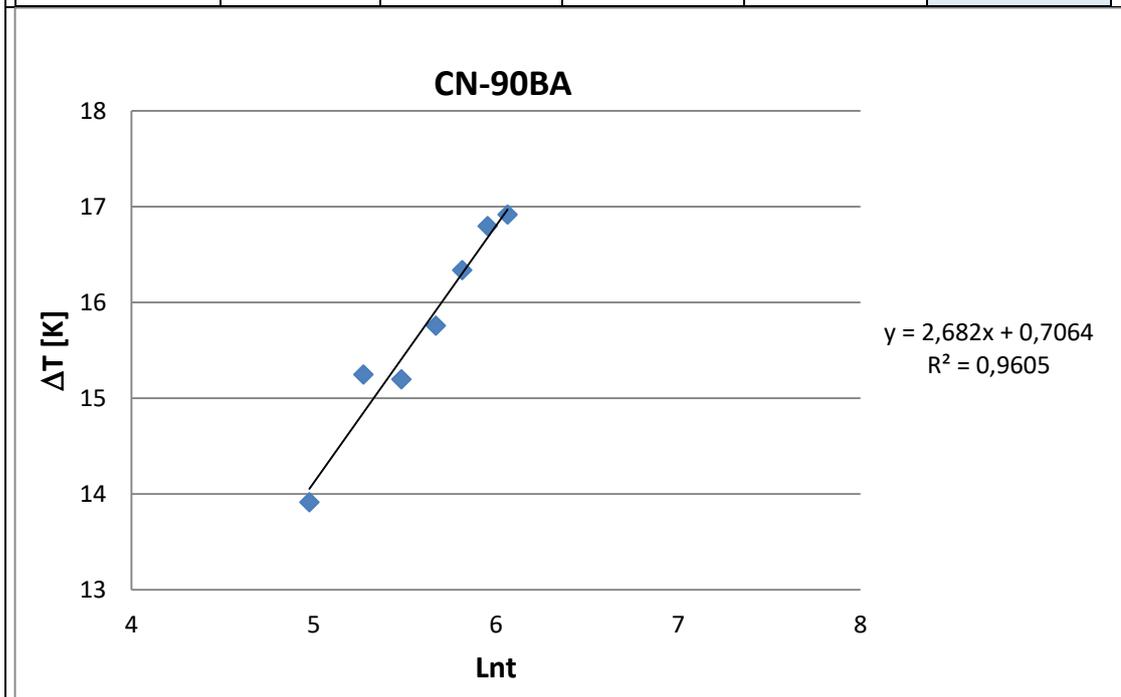


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	1	2,77	0,11	0,9847	2,03

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

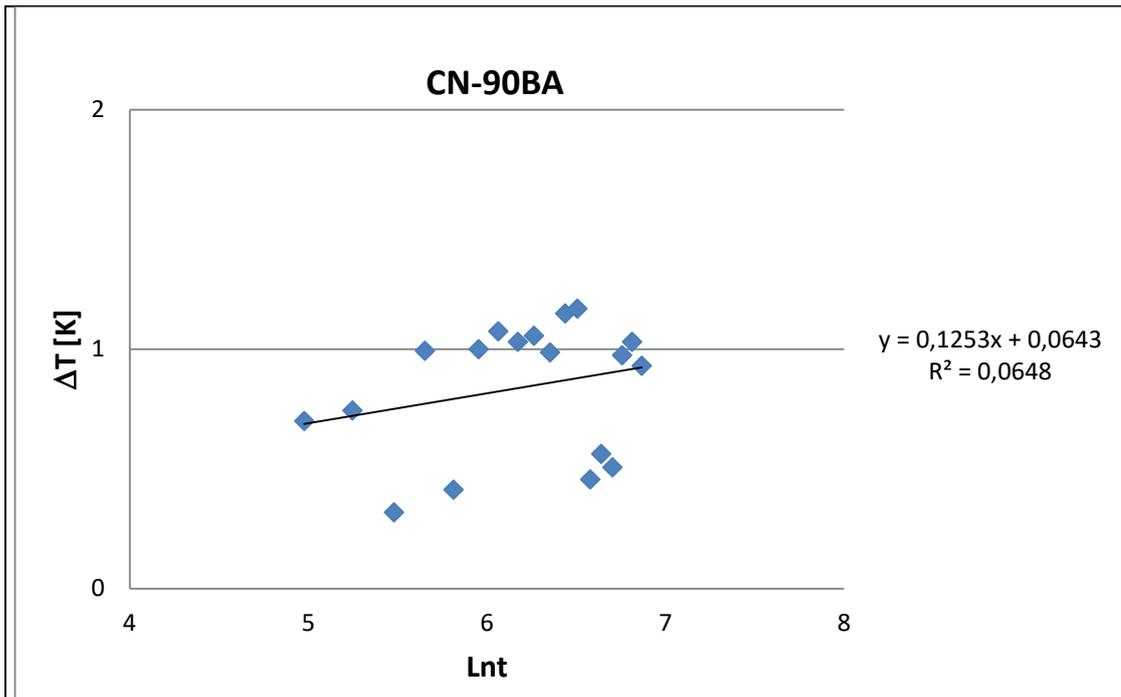


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	1,5	4,12	0,11	1,6318	2,74

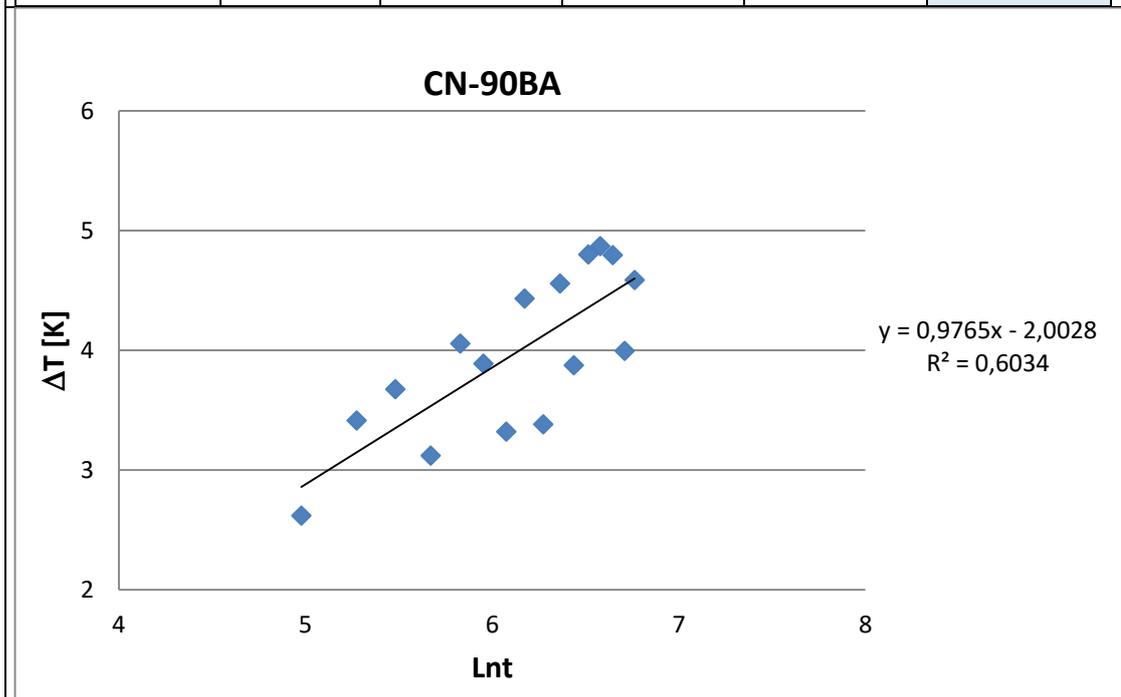


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
110 x 50 x 35	2	5,51	0,11	2,682	2,97

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

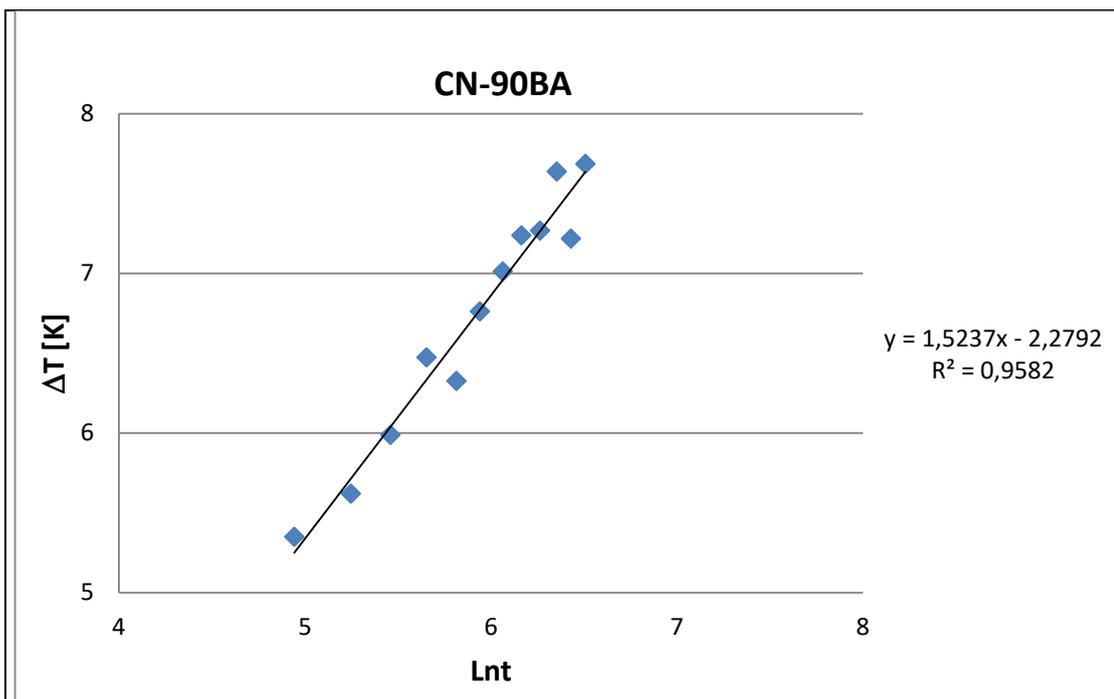


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	0,5	2,18	0,18	0,1253	3,91

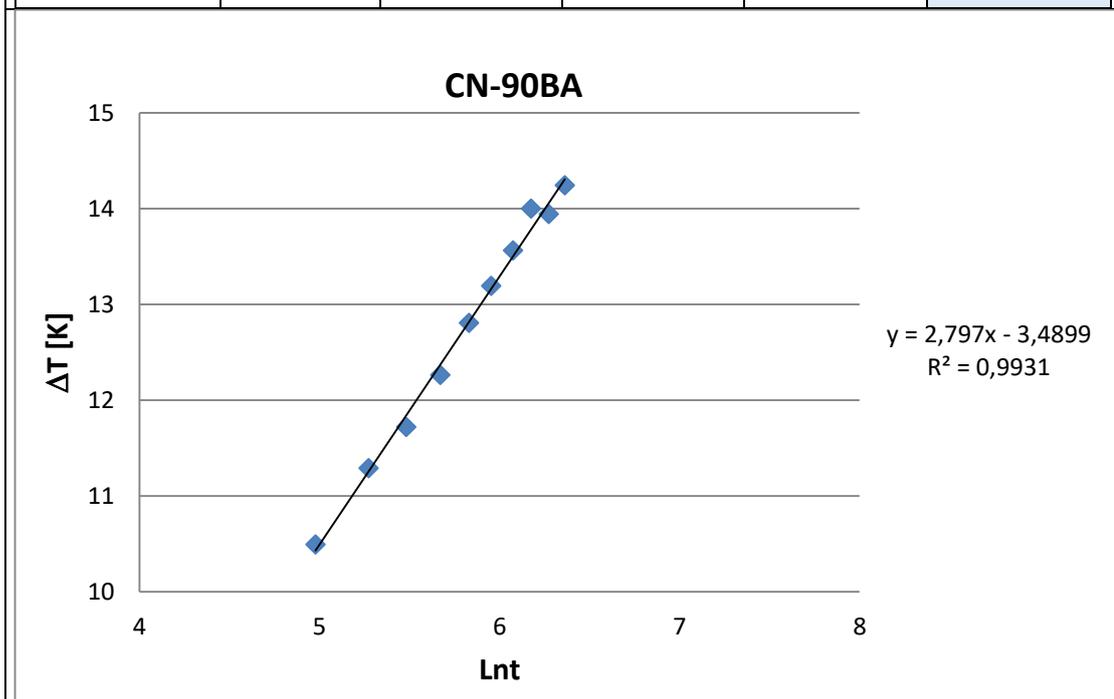


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1	4,53	0,18	0,9765	2,05

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

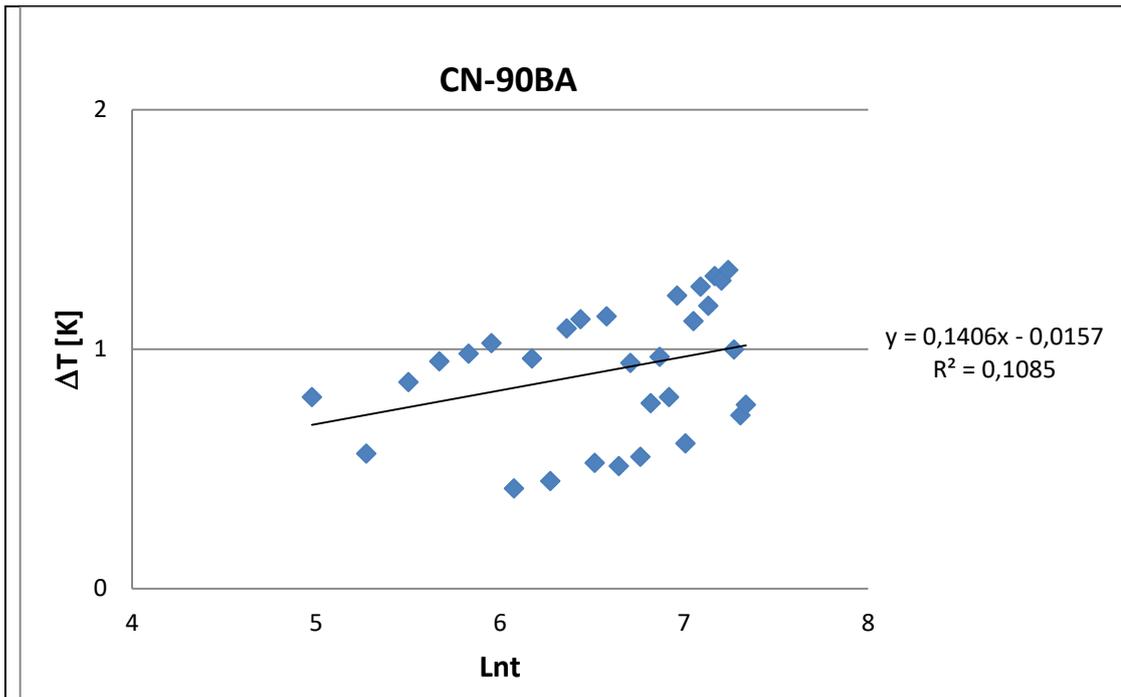


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1,5	6,73	0,18	1,5237	2,93

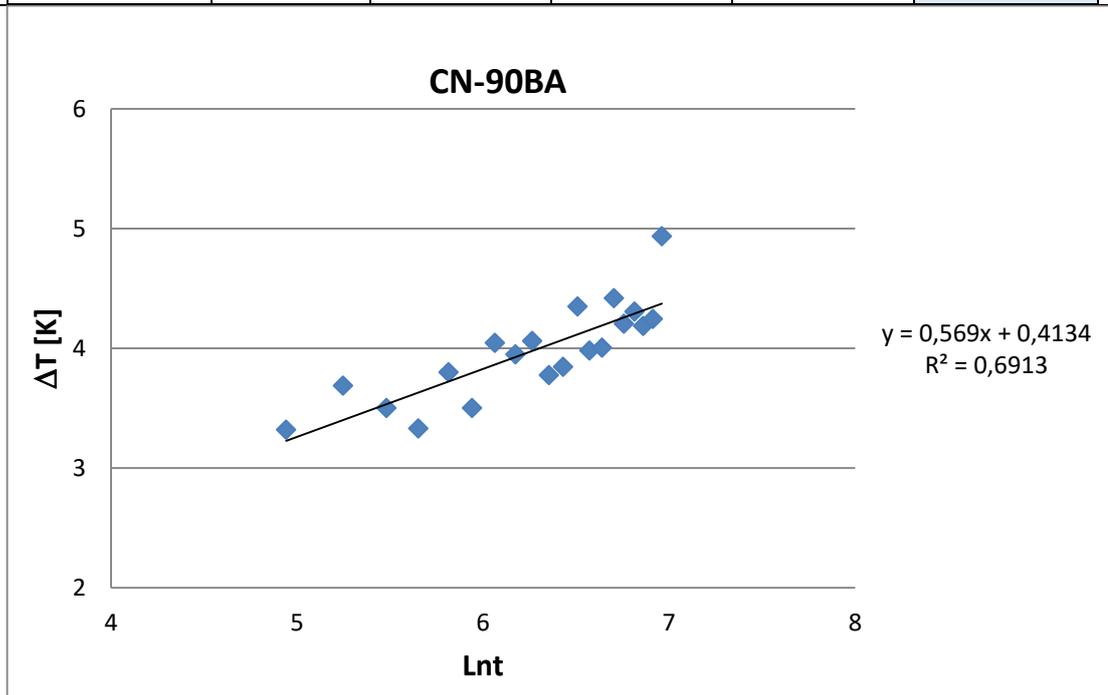


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	2	9,01	0,18	2,797	2,85

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

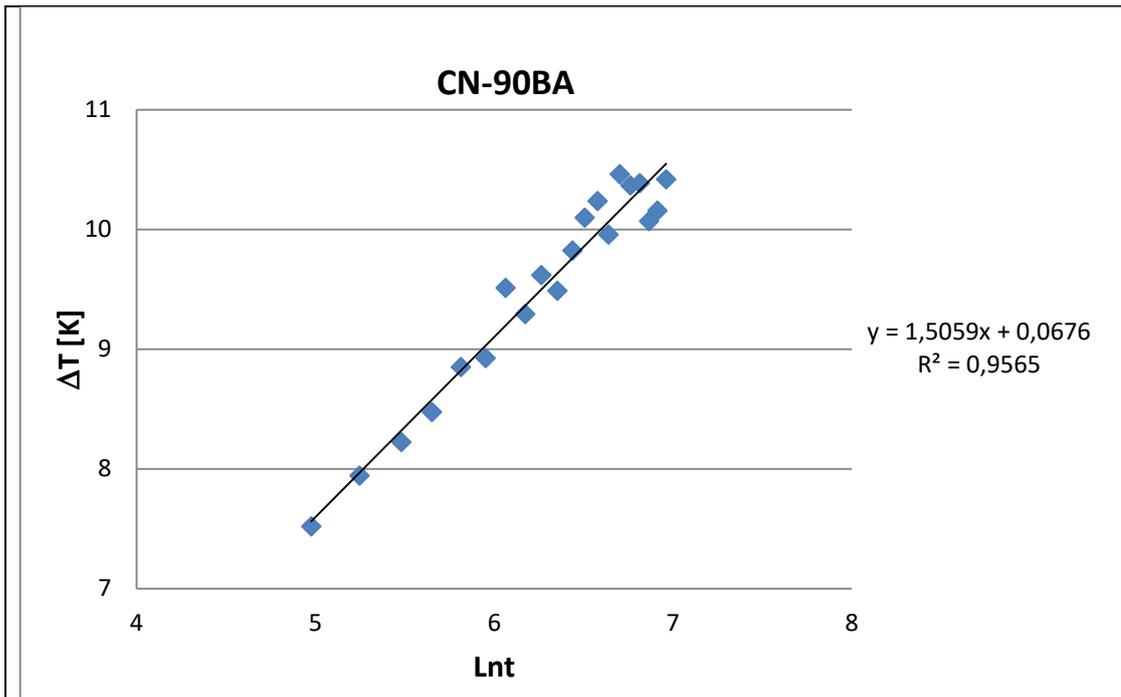


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	0,5	2,93	0,24	0,1406	3,48

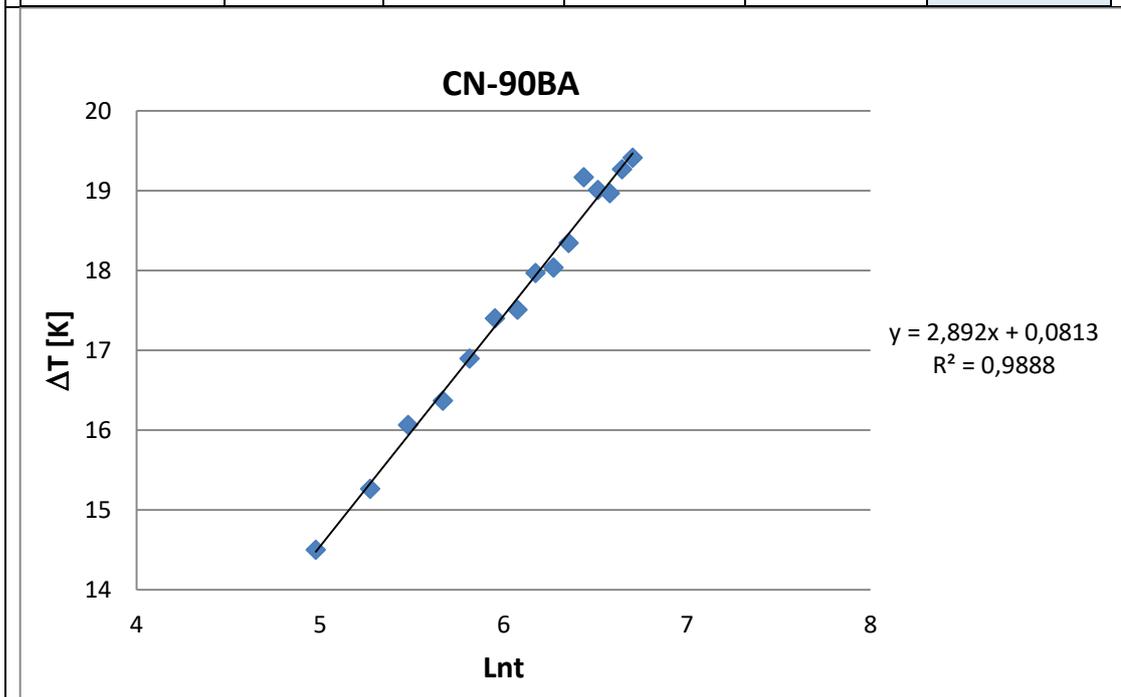


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	1	6,04	0,24	0,569	3,52

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

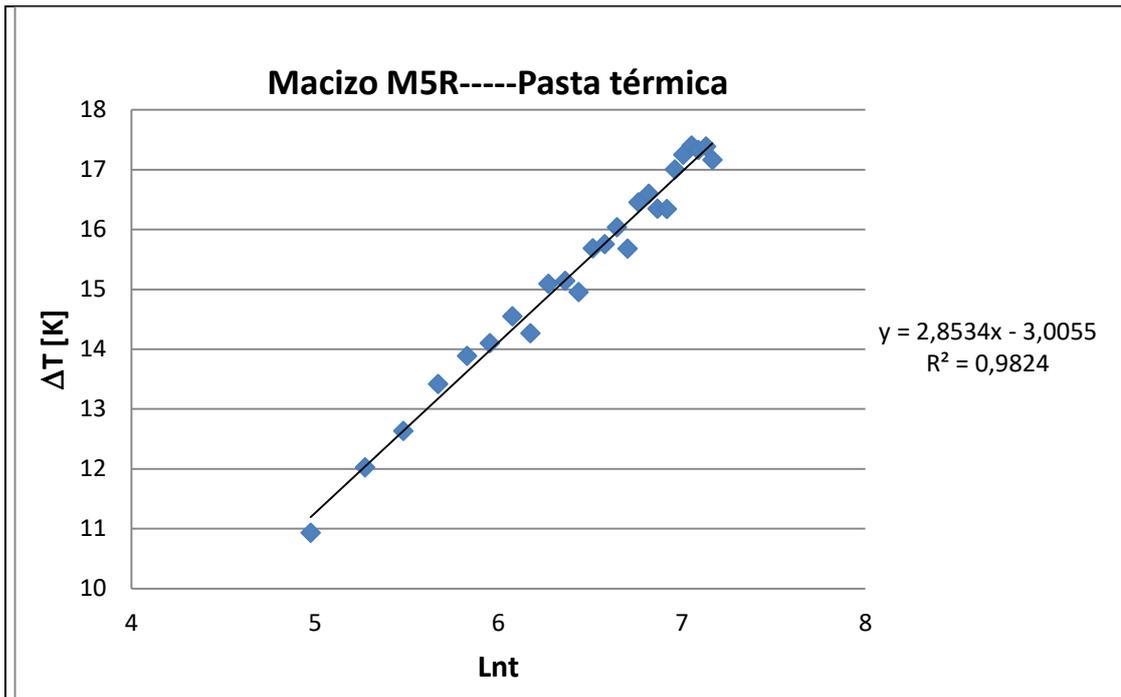


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	1,5	8,99	0,24	1,5059	2,97

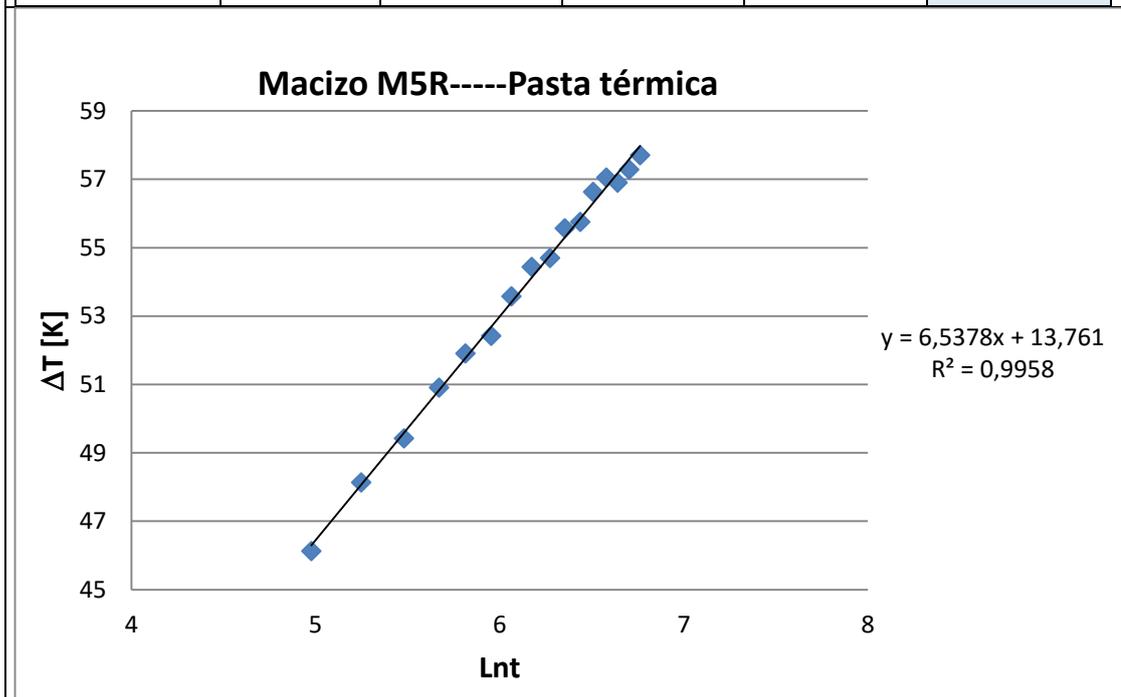


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
240 x 120 x 60	2	12,02	0,24	2,89	2,76

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

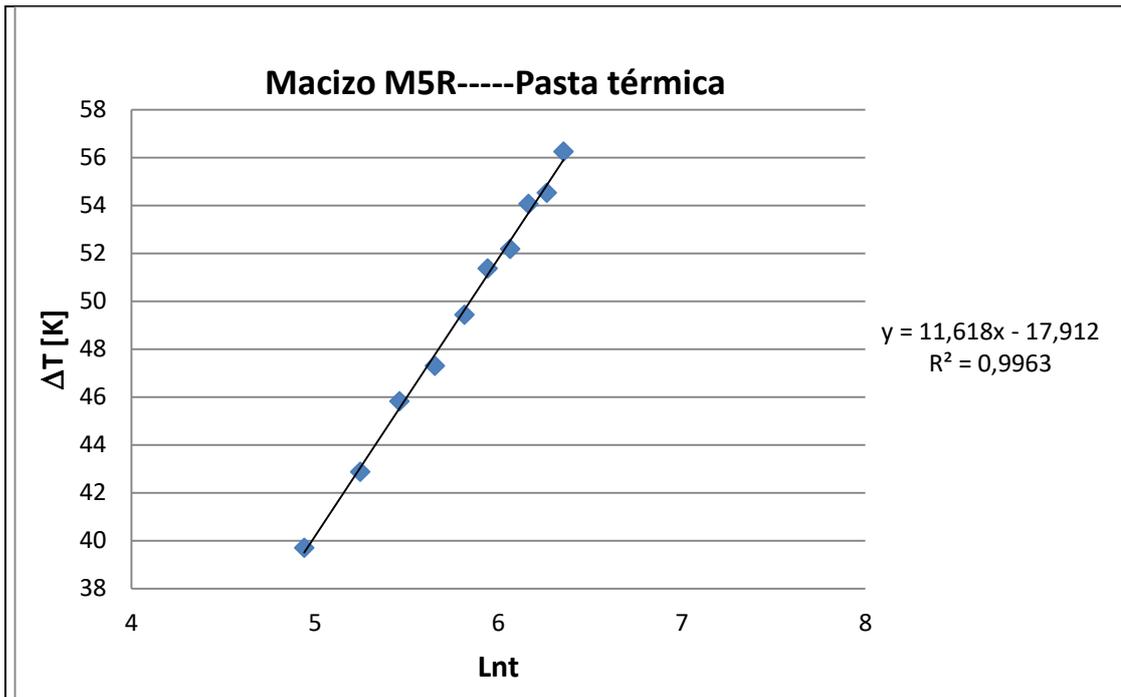


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1	4,53	0,18	2,8534	0,70

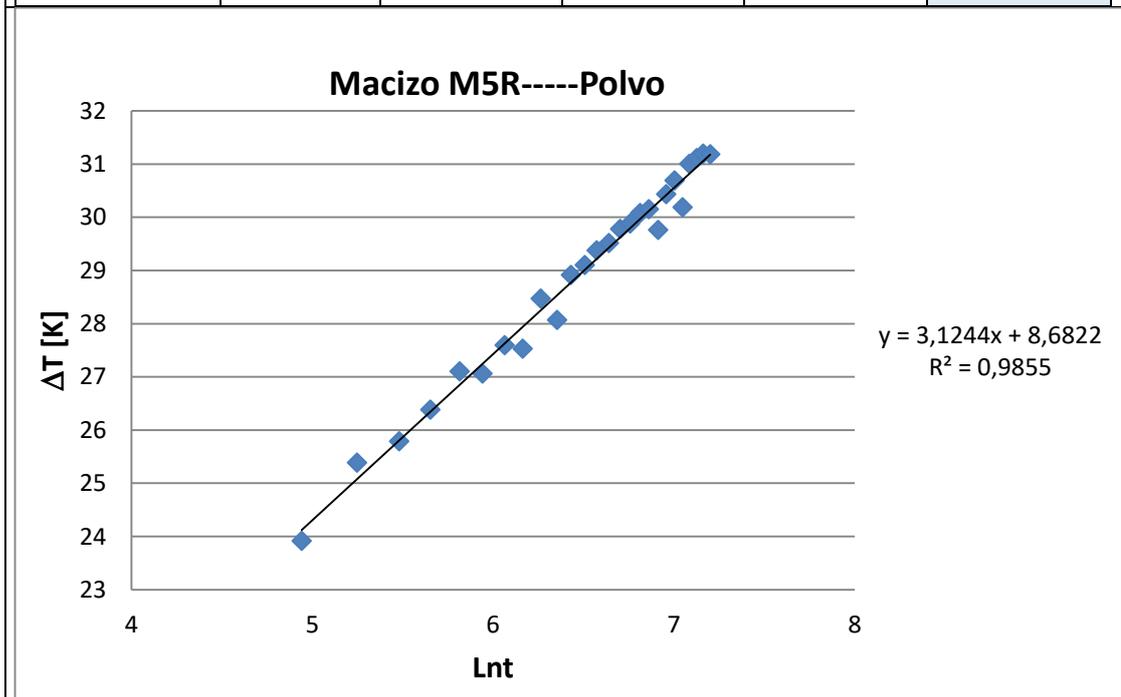


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1,5	6,74	0,18	6,5378	0,68

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

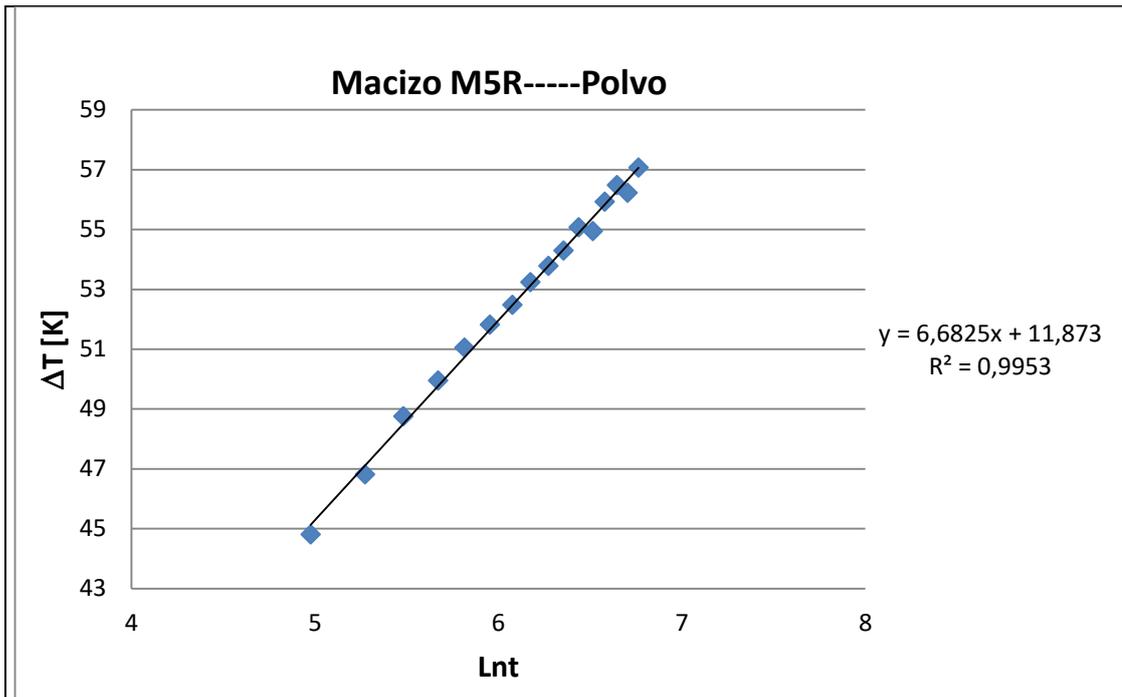


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	2	9,01	0,18	11,618	0,69

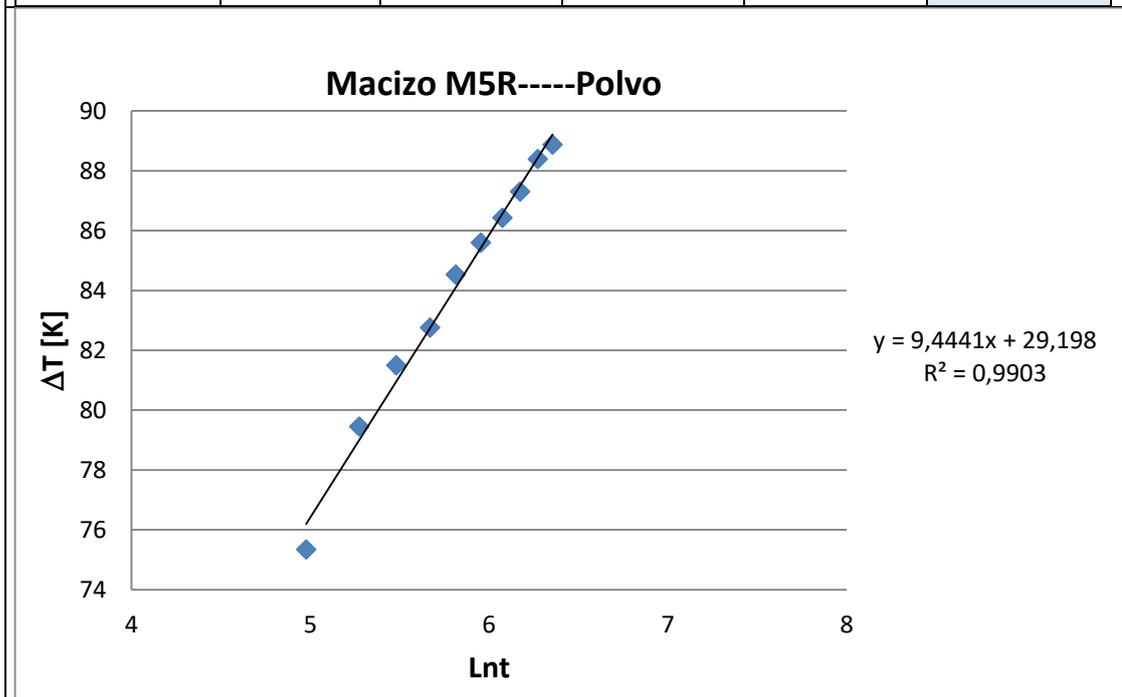


Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1	4,53	0,18	3,1244	0,64

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO



Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	1,5	6,74	0,18	6,6825	0,67



Tamaño [mm]	I [A]	ΔV [V]	L [m]	m	λ_{exp} [W/m.K]
180 x 70 x 50	2	9,01	0,18	9,4441	0,84

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

9.7 ANEXO VII. Incertidumbre de medida en el equipo MCT

Al realizar un ensayo para determinar la conductividad térmica con el equipo MCT se cometen una serie de errores, tanto sistemáticos como aleatorios, que hacen que el valor medido difiera del valor real.

Las fuentes de incertidumbre que afectan al resultado obtenido en el ensayo de conductividad térmica con el equipo MCT, se pueden agrupar en cinco bloques:

- Las debidas al modelo matemático. Son producidas por las simplificaciones asumidas en el modelo matemático ILS. Este modelo parte de una serie de idealizaciones que sólo se cumplen parcialmente, pues realmente las muestras tienen dimensiones finitas, el hilo de calentamiento tiene masa y longitud finita, etc.
- Las debidas a la muestra. Aquí están incluidas, por ejemplo, los errores que la rugosidad de la muestra o su humedad provocan en la determinación de la conductividad térmica.
- Las debidas al instrumental de medida. Principalmente se incluye la precisión del termopar y del multímetro, así como la incertidumbre de las medidas realizadas con el flexómetro y la debida a los componentes electrónicos empleados en el registrador de datos.
- Las debidas al proceso de medida. Se incluye aquí el error cometido en el posicionamiento de la muestra en el equipo de medida, así como el causado por no respetar el tiempo mínimo necesario entre dos medidas consecutivas.
- Las debidas al procedimiento de obtención del resultado final. Por ejemplo, se incluye el error en la estimación de la zona recta de la curva $\Delta T-Lnt$ y el error matemático del ajuste mínimo-cuadrático.

A continuación, se describe el procedimiento de cálculo de la incertidumbre de medida del equipo MCT. Dicha incertidumbre engloba las fuentes aquí citadas, que son las responsables de la existencia de errores sistemáticos y aleatorios en la medida de la conductividad térmica.

La estimación de la incertidumbre de medida se realiza aplicando los criterios establecidos en la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, publicada por el Centro Español de Metrología ([CEM, 2008](#)).

9.7.1 Estimación de la incertidumbre de medida

La cuantificación de la incertidumbre de medida de las muestras ensayadas con el equipo MCT se realiza mediante un análisis estadístico de los valores de conductividad térmica obtenidos en los ensayos (evaluación Tipo A). También se ha tenido en cuenta la incertidumbre de los certificados de calibración de las 4 muestras-patrón (evaluación Tipo B).

El objetivo de la medición es obtener el valor del mensurando. La relación entre las magnitudes de entrada X_i y el mensurando Y se representa como una función f , donde:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad [39]$$

El mejor estimador de las magnitudes de entrada X_i se denota con x_i . Por otra parte, el mejor estimador del valor del mensurando Y se denota con y . Así nos queda:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad [40]$$

Para poder calcular la incertidumbre estándar combinada u_y se aplica la ley de propagación de incertidumbres, que en nuestro caso, como las magnitudes de entrada son independientes, tenemos:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i \cdot u_{x_i})^2} \quad [41]$$

Donde c_i son los coeficientes de sensibilidad, obtenidos mediante la expresión:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad [42]$$

Como el proceso de obtención de la conductividad térmica con el equipo de medida MCT consta de un resultado con varias fuentes de incertidumbre, su modelización matemática se simplifica a la siguiente expresión:

$$y = x_1 + x_2 \quad [43]$$

De este modo, al aplicar la expresión [42] nos queda $c_i = 1$. Por tanto, la expresión [41] se convierte en:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_{x_i}^2} = \sqrt{u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2} \quad [44]$$

Si en la expresión [43], y corresponde al valor de la medida corregida (M), x_1 corresponde al valor medio sin corregir (\bar{m}) y x_2 corresponde a la corrección de calibración (C), tenemos:

$$M = \bar{m} + C \quad [45]$$

Aplicando la expresión [44], tenemos que la incertidumbre estándar combinada de una medida corregida será:

$$u_M = \sqrt{u_{\bar{m}}^2 + u_C^2} \quad [46]$$

Donde:

$$u_{\bar{m}} = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{der}^2 + u_{amb}^2} \quad [47]$$

Se considera despreciable la incertidumbre por deriva (u_{der}) y la incertidumbre por variación de las condiciones ambientales (u_{amb}). Para determinar la incertidumbre por la repetibilidad (u_{rep}) de las medidas se realizan n ensayos de conductividad térmica en cada muestra.

$$u_{rep} = \frac{s_c}{\sqrt{n}} \quad [48]$$

Siendo s_c la desviación típica del equipo, obtenida durante la calibración:

$$s_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2}{N - 1}} \quad [49]$$

Donde z son los valores de conductividad térmica medidos durante la calibración ($N=10$). Por lo que, la expresión [47] queda:

$$u_{\bar{m}} = \frac{s_c}{\sqrt{n}} \quad [50]$$

Por otra parte:

$$u_C = \sqrt{u_{pat}^2 + u_{med}^2} \quad [51]$$

Donde:

$$u_{pat} = \sqrt{u_{cer}^2 + u_{der}^2 + u_{amb}^2} \quad [52]$$

$$u_{med} = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{der}^2 + u_{amb}^2} \quad [53]$$

Se considera despreciable la incertidumbre por deriva (u_{der}), tanto en las muestras-patrón como en el equipo MCT. Igualmente, se considera despreciable la incertidumbre por variación de las condiciones ambientales (u_{amb}).

Por lo que la expresión [51] nos queda:

$$u_c = \sqrt{u_{cer}^2 + u_{rep}^2} \quad [54]$$

Donde u_{cer} es la incertidumbre expandida del certificado de calibración de las muestras-patrón (U_{cer}) dividido por el factor de cobertura (K). Al considerarse que la distribución de probabilidad del mensurando es normal y para un factor de cobertura igual a 2 (corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %), tenemos:

$$u_{cer} = \frac{U_{cer}}{K} = \frac{U_{cer}}{2} \quad [55]$$

Para determinar la incertidumbre por la repetibilidad (u_{rep}) de la calibración se han realizado 10 ensayos de conductividad térmica sobre cada una de las 4 muestras- patrón, obteniéndose la desviación típica s_c . Además, como W toma por valor la unidad cuando el número de ensayos N es mayor o igual a 10, tenemos:

$$u_{rep} = \frac{W \cdot s_c}{\sqrt{N}} = \frac{s_c}{\sqrt{10}} \quad [56]$$

Por lo tanto, sustituyendo las expresiones [55] y [56] en la expresión [54], nos queda:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{U_{cer}}{K}\right)^2 + \left(\frac{W \cdot s_c}{\sqrt{N}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{cer}}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{\sqrt{10}}\right)^2} \quad [57]$$

Finalmente, sustituyendo las expresiones [50] y [57] en la expresión [46] obtenemos que la incertidumbre estándar combinada queda:

$$u_M = \sqrt{\left(\frac{s_c}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{U_{cer}}{K}\right)^2 + \left(\frac{W \cdot s_c}{\sqrt{N}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{s_c}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{U_{cer}}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{\sqrt{10}}\right)^2} \quad [58]$$

Por último, para obtener la incertidumbre expandida utilizamos el factor de cobertura K que, como en nuestro caso se sigue una distribución normal, toma un valor igual a 2 (corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95 %).

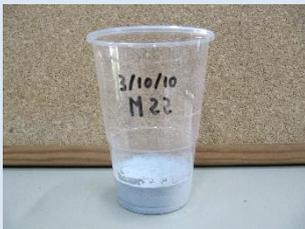
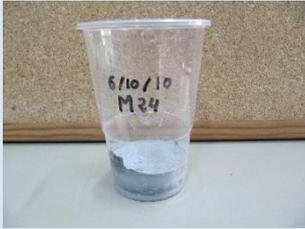
$$U_M = K \cdot u_M = 2 \cdot u_M \quad [59]$$

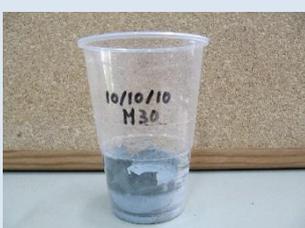
9.8 ANEXO VIII. Ficha resumen de las muestras realizadas

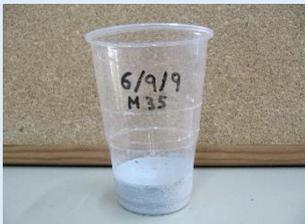
Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
M 11			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 12			Poco dócil, bastante exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 13			Poco dócil, bastante exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 14			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 15			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

ESTUDIO DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y DESARROLLO DE UN MORTERO GEOTÉRMICO

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
M 16			Poco dócil, poca exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 17			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 18			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 19			Poco dócil, sin exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 20			Bastante dócil, sin exudación tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
M 21			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 22			Poco dócil, poca exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 23			Bastante dócil, sin exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 24			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 25			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
M 26			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 27			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 28			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 29			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 30			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
M 31			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 32			Bastante dócil, sin exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 33			Dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 34			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 35			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
M 36			Dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 37			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 38			Bastante dócil, sin exudación, bastante agua de amasado, tiempo de trabajabilidad tolerable, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 39			Bastante dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
M 40			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
MG 1			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
MG 2			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
MG 3			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
MG 4			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
MG 5			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia

Nombre	Vista en planta	Vista lateral	Observaciones
MG 6			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia
MG 7			Muy dócil, sin exudación, tiempo de trabajabilidad óptimo, sin fisuración, sin agrietamiento, sin retracción, mucha resistencia