



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos



TESIS DOCTORAL

**INFLUENCIA DEL TIPO DE ÁRIDO EN LAS PROPIEDADES
TÉRMICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS UTILIZADOS COMO
RELLENO GEOTÉRMICO**

Autor:

ROQUE BORINAGA TREVIÑO

Directores:

DANIEL CASTRO FRESNO

PABLO PASCUAL MUÑOZ

Santander, 2014



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos



Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

TESIS DOCTORAL

INFLUENCIA DEL TIPO DE ÁRIDO EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS UTILIZADOS COMO RELLENO GEOTÉRMICO

Autor:

ROQUE BORINAGA TREVIÑO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directores:

DANIEL CASTRO FRESNO

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

PABLO PASCUAL MUÑOZ

Doctor Ingeniero Industrial

Santander, 2014

AGRADECIMIENTOS

Los casi 4 años que he estado desarrollando el trabajo que ha dado lugar a esta tesis han supuesto un reto tanto a nivel personal como profesional. Durante este tiempo he tenido que afrontar numerosas dificultades que no hubiera podido salvar si no fuera por el apoyo humano tanto de mis compañeros de trabajo como de mi familia, amigos y de mi querida novia Paula.

En primer lugar, deseo agradecer a mis directores de tesis Daniel Castro Fresno y Pablo Pascual Muñoz por facilitarme el apoyo económico y académico que he precisado durante la realización de esta tesis, así como por haberme permitido ser parte del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO). Agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España la ayuda concedida para realizar el proyecto de investigación “Desarrollo de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, mediante firmes filtrantes en aparcamientos de tráfico ligero, para su valorización en usos no potables y empleo como medio de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía (VEA)” [BIA2009-08272] financiado con cargo al Presupuesto General del Estado (PGE) dentro del Plan Nacional 2008-2011. También quiero agradecer al profesor Jorge Rodríguez Hernández por la ayuda prestada, ya que ha supuesto un apoyo técnico adicional en los momentos de mayor necesidad, y a Jaime, Miguel, Valerio e Iván la ayuda aportada para la realización de los ensayos tanto en laboratorio como en campo cuando ha hecho falta. Quiero agradecer a las empresas CISA Castilla S.A., Impulso Industrial Alternativo S.A. y Sacyr Industrial por su participación en el proyecto del que surge esta tesis, así como al Laboratorio de Caminos y al grupo LADICIM de la Universidad de Cantabria y al grupo GICONSIM de la Universidad de Oviedo por haberme proporcionado los medios físicos necesarios para la realización del trabajo desarrollado en este documento.

Por otra parte, quiero agradecer a mis amigos Luis, Gonzalo, Irene, Alex, Elsa, Carlos, Pedro y Valerio por los agradables momentos de desconexión proporcionados durante la media hora de café que partía y hacía más llevadera la larga mañana. No creo que ninguno olvide mis chistes, en especial el del plátano en la oreja en sus vidas. Gracias también a mi compañero de piso Juan por haber facilitado la convivencia en nuestro piso, y en especial a José Ernesto Norambuena Contreras ya que no solamente me ha apoyado como amigo, sino que además me ha aconsejado durante la redacción de la tesis y me ha brindado un especial apoyo a nivel personal.

Quiero agradecer a mis padres M^a Carmen y Jose Ignacio y a mis hermanos Teresa, Ignacio y Miguel por la paciencia, comprensión, apoyo y fortaleza mostrados durante todo este tiempo, en el que han estado siempre presentes pese a los momentos difíciles que hemos atravesado. De una manera muy especial, quiero dar las gracias a mi novia Paula, por darme el apoyo emocional necesario para afrontar no solo la tesis sino el resto de acontecimientos que han surgido durante la misma. Sin todos ellos no habría aguantado los 4 duros años de desgaste mental que me han supuesto la consecución de este trabajo, razón por la cual les dedico esta tesis.

Por último, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido al desarrollo de esta tesis doctoral con su apoyo, comentarios, sugerencias y ayuda.

RESUMEN

El incremento de la demanda mundial de energía, junto al calentamiento global del planeta ha hecho que el interés sobre las energías renovables haya ganado en importancia. En este contexto, los sistemas de climatización geotérmica mediante bombas de calor suponen una alternativa ecológica y eficiente a los sistemas basados en combustibles fósiles, de los cuales se cuenta con un amplio conocimiento en la actualidad. Sin embargo, su lenta implantación en España se debe sobre todo al alto coste inicial que supone la construcción del intercambiador geotérmico en el terreno. Los rellenos geotérmicos son una parte fundamental a la hora de diseñar un sistema geotérmico vertical de lazo cerrado. En la actualidad existen numerosos rellenos comerciales de alta conductividad térmica que permiten, a su vez, incrementar la eficiencia de las instalaciones geotérmicas. Sin embargo, no se ha analizado la posibilidad de emplear áridos alternativos al cuarzo o a la arena silíceas que permitan la confección de rellenos más económicos y duraderos a los actuales. En esta tesis se analiza la posibilidad de uso de dos áridos naturales -arena caliza y silícea- y dos áridos reciclados -escoria de horno de arco eléctrico (EAE) y residuos de construcción y demolición (RCD)- como materiales principales de morteros empleados como relleno geotérmico. En todos los casos analizados, la adición de árido ha mejorado las propiedades mecánicas y térmicas del mortero. Los áridos calizo, silíceo y EAE aumentaron la conductividad térmica del mortero a medida que se aumentó su proporción de uso. Sin embargo, el RCD hizo disminuir la conductividad térmica del mortero resultante para proporciones mayores al doble de cemento en peso debido a su gran absorción de agua. Al igual que con la conductividad térmica, cualquiera de los áridos estudiados mejoró la durabilidad frente al hielo-deshielo del mortero resultante. No se observó un daño significativo debido a los ciclos de hielo-deshielo realizados en ninguno de los morteros con contenido de árido, probablemente debido a las condiciones de parcial saturación del mismo en su interior. Para comprobar la influencia real de los rellenos analizados en laboratorio, se construyeron intercambiadores geotérmicos de lazo cerrado en una instalación de la empresa CISA Castilla localizada en Boecillo, Valladolid (España). Para determinar la eficiencia de cada perforación se realizaron 4 tests de respuesta térmica (TRT), uno por cada tipo de relleno inyectado. El análisis de los TRTs permitió eliminar la influencia de la temperatura ambiente y así determinar la conductividad térmica del terreno. Sin embargo, no se apreciaron diferencias significativas en la eficiencia del intercambiador debidas a los diferentes rellenos empleados.

ABSTRACT

Due to the increasing fossil fuel prices and global warming effect, some leading countries have started to search for new renewable energy sources. In this context, Ground-Coupled Heat Pumps systems have proved to be the most efficient system for heating and cooling buildings, as stated by the Environmental Protection Agency [1]. Although the required technology is well known, its implementation in Spain is reduced due to the high initial cost of the installation, which is mainly attributed to the construction of the ground heat exchanger. As part of a closed-loop ground heat exchanger, geothermal grouting material is fundamental on its overall efficiency. At present, there are different high thermal conductivity commercial grouts, most of them based on the use of quartz or silica sand as main aggregate, that ensure a correct filling of the borehole and with a high thermal efficiency. However, no alternative aggregate has been analyzed that would permit the confection of more economic and durable grouts than the ones used nowadays. This thesis analyzes the possibility of using two natural aggregates - limestone and silica sand - and two recycled aggregates – electric arc furnace (EAF) and construction and demolition waste (CDW) – as the main material of geothermal grouting mortars. As observed in the mortars analyzed in laboratory, the addition of any aggregate to the grout significantly increased its thermal conductivity. Moreover, the type of aggregate used caused a greater influence on the thermal conductivity than its proportion. Limestone, silica and EAF aggregates improved thermal conductivity of the grout with the increase of its proportion of use. However, CDW aggregate reduced the thermal conductivity of the mortar for a higher than twice the cement proportion of CDW aggregate by weight due its high water absorption. Regarding freeze thaw durability, no significant damage was observed on the mechanical and thermal properties of the mortars containing any of the aggregates proposed, probably due to the non saturation of the probe core. As for the thermal conductivity, it was observed that any aggregate used improved mortar freeze thaw durability and had a bigger influence on the evaluated properties than the damage caused. Finally, 4 different grouting materials were injected in 12 different boreholes at Boecillo, Valladolid (Spain) to determine the influence of the grouting material on the borehole thermal efficiency. For that purpose, 4 different thermal response tests were executed in 4 different boreholes, each containing a different grout. The method used for the TRT analysis permitted the partial removal of the ambient temperature influence on the estimated thermal conductivity and borehole thermal resistance. However, no significant influence of the grout type used on the borehole thermal resistance was observed, probably due to the collapsible nature of the ground, which was partially mixed with the injected grout.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES DE LA TESIS	1
1.1 MOTIVACIÓN: IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA	3
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	6
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 ENERGÍA GEOTÉRMICA: CLASIFICACIÓN DE USOS	11
2.2 ENERGÍA GEOTÉRMICA MEDIANTE BOMBAS DE CALOR	12
2.2.1 SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN INTERNO DEL RECINTO	13
2.2.2 BOMBA DE CALOR	14
2.2.3 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	16
2.3 SISTEMA GEOTÉRMICO VERTICAL DE LAZO CERRADO.....	21
2.3.1 Sonda GEOTÉRMICA.....	23
2.3.2 RELLENO GEOTÉRMICO	24
2.3.3 TEST DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT).....	30
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO COMO MORTERO GEOTÉRMICO.....	41
3.1 CRITERIOS DE DISEÑO	43
3.2 MATERIALES EMPLEADOS	44
3.2.1 CEMENTO	44
3.2.2 ÁRIDOS	44
3.2.3 ADITIVOS.....	54
3.3 ENSAYOS.....	55
3.3.1 ENSAYO DE LA MESA DE SACUDIDAS	55
3.3.2 DENSIDAD APARENTE EN FRESCO	55
3.3.3 DENSIDAD APARENTE EN ENDURECIDO Y POROSIDAD ACCESIBLE.....	56
3.3.4 RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN SIMPLE	58
3.3.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA APARENTE.....	59
3.3.6 RESISTENCIA DE ADHERENCIA.....	64
3.4 INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS.....	66
3.4.1 DOSIFICACIONES PROPUESTAS.....	66
3.4.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ENSAYO.....	68
3.5 DURABILIDAD DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO.....	70
3.5.1 CICLOS DE HIELO-DESHIELO	70
3.5.2 DOSIFICACIONES EMPLEADAS.....	72

3.5.3	PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ENSAYO.....	72
3.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
3.6.1	INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS.....	75
3.6.2	DURABILIDAD DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO	85
3.6.3	APLICACIÓN DE LOS RELLENOS ANALIZADOS	97
CAPÍTULO 4.	INFLUENCIA DEL RELLENO EN LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO	99
4.1	INTRODUCCIÓN	101
4.2	RELLENOS GEOTÉRMICOS EMPLEADOS	102
4.2.1	MATERIALES EMPLEADOS.....	102
4.2.2	DOSIFICACIONES EMPLEADAS.....	106
4.3	CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO	107
4.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS VERTICALES IN SITU	109
4.4.1	CONSTRUCCIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS.....	109
4.4.2	TESTS DE RESPUESTA TÉRMICA	115
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	126
4.5.1	CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO	126
4.5.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS VERTICALES	127
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	139
5.1	CONCLUSIONES	141
5.1.1	INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS.....	141
5.1.2	DURABILIDAD DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO	143
5.1.3	INFLUENCIA DEL RELLENO EMPLEADO EN LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO	144
5.2	RECOMENDACIONES FUTURAS.....	146
5.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	148
REFERENCIAS		151
ANEXO DE RESULTADOS		163
A1.	INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS.....	165
A2.	DURABILIDAD DE LOS RELLENOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO.....	167
A3.	RESULTADOS DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA REALIZADOS.....	179
A4.	RESULTADOS DE LOS TEST DE RESPUESTA TÉRMICA.	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Posibles usos de la energía geotérmica en función de su temperatura.....	11
Fig. 2.	Componentes principales de una instalación de aprovechamiento de la energía geotérmica mediante bombas de calor.....	12
Fig. 3.	Esquema simplificado del funcionamiento del Fan-coil.....	13
Fig. 4.	Esquema simplificado de una bomba de calor.....	14
Fig. 5.	Circuito en modo a) calefacción y b) refrigeración.....	15
Fig. 6.	Clasificación de sistemas geotérmicos mediante bombas de calor.....	16
Fig. 7.	Sistema geotérmico de lazo abierto.....	16
Fig. 8.	Sistema horizontal de lazo abierto. Caso con una piscina.....	17
Fig. 9.	Pozo único con re-inyección en superficie drenante.....	18
Fig. 10.	Pozo único con re-inyección.....	18
Fig. 11.	Pozo doble con re-inyección en profundidad.....	19
Fig. 12.	Esquema simplificado de un sistema de lazo cerrado.....	19
Fig. 13.	Sistemas horizontales de lazo cerrado: a) convencional, b) con espirales tipo “slinky” y c) en zanja.....	20
Fig. 14.	Sistema vertical de lazo cerrado: a) sistema de intercambiadores vertical en perspectiva y b) ejemplo de geometría en planta que permite la interferencia mínima entre sondas y además permite el aprovechamiento inter-estacional de energía bajo la presencia de corrientes subterráneas.....	22
Fig. 15.	Componentes de un sistema vertical de lazo cerrado.....	22
Fig. 16.	Distintas secciones de tuberías posibles.....	23
Fig. 17.	Esquema básico de funcionamiento del equipo necesario para la realización de TRTs.....	31
Fig. 18.	Modelo empleado para el análisis de la sensibilidad del método ILS: a) geometría y mallado del terreno en planta, b) detalle de la geometría y mallado empleado en el relleno, tuberías y fluido intercambiador de calor, c) detalle del modelo empleado en el fluido y d) descripción de los elementos empleados en cada caso.....	40
Fig. 19.	Arena caliza empleada a) granulometría de 0/5 mm original y b) granulometría de 0/2 mm final (escala en cm).....	45
Fig. 20.	Arena sílicea empleada en laboratorio a) granulometría 0/4 mm original y b) granulometría 0/2 mm final (escala en cm).....	46
Fig. 21.	Filler calizo empleado en laboratorio (escala en cm).....	47
Fig. 22.	Arena de EAE empleada en laboratorio a) granulometría 0/6 mm original y b) granulometría 0/2 mm final (escala en cm).....	50
Fig. 23.	Comparación de la granulometría obtenida en la EAE con las de referencia.....	51
Fig. 24.	Arena de RCD empleada en laboratorio a) granulometría 0/6 mm original y b) granulometría 0/2 mm final (escala en cm).....	52
Fig. 25.	Granulometría obtenida en el RCD frente a las de referencia.....	54
Fig. 26.	Realización del ensayo de sacudidas: a) equipo empleado, b) llenado del molde y c) situación del mortero una vez terminado el ensayo.....	55
Fig. 27.	Ensayo de densidad aparente en endurecido: a) molde empleado para la fabricación de probetas y b) probetas ensayadas.....	57
Fig. 28.	a) Ensayo de flexión y b) ensayo a compresión simple.....	58

Fig. 29.	Ensayo realizado con la máquina TCi de C-Therm.	61
Fig. 30.	Equipo TPSYS02: a) equipo, b) esquema de la aguja TP02.....	61
Fig. 31.	a) Probeta empleada, b) posición final del tubo guía y c) disposición de la aguja en el momento de ensayo.....	62
Fig. 32.	Análisis de la curva en escala logarítmica y ajuste por mínimos cuadrados.....	63
Fig. 33.	Probeta empleada en el ensayo de adherencia: a) alzado, b) planta, c) probeta resultante, y d) detalle del hueco creado en el fondo para el descenso del tubo.	64
Fig. 34.	Realización del ensayo de adherencia: a) máquina empleada, b) probeta durante el ensayo.....	65
Fig. 35.	Amasadora de eje vertical.....	67
Fig. 36.	Amasadora planetaria empleada.	68
Fig. 37.	Mezclador acoplado al taladro empleado para amasar la lechada de cemento.	69
Fig. 38.	Grados de saturación del relleno posibles en función de la profundidad de la perforación.	71
Fig. 39.	Amasadora de tambor basculante empleada.	72
Fig. 40.	Probetas realizadas para el análisis de durabilidad de una de las dosificaciones propuestas.	73
Fig. 41.	Densidades del mortero fresco para los diferentes áridos y proporciones analizadas. ...	75
Fig. 42.	a) Densidad aparente en endurecido y b) porosidad accesible en función de la proporción de árido empleada.	77
Fig. 43.	Fuerza a compresión: a) a los 7 días y b) a los 28 días de curado.....	78
Fig. 44.	Poros observados en la sección de rotura de las amasadas realizadas: a) huecos en C ₂ , b) huecos en RCD ₂ , c) huecos en EAE ₂ y d) huecos en S ₂	80
Fig. 45.	Conductividad térmica del mortero en función del tipo y proporción de árido empleado.	81
Fig. 46.	Distribuciones volumétricas del mortero y proporción de agua empleada en su mezcla en función del tipo y proporción de árido.	84
Fig. 47.	Resistencia mecánica de los morteros en función de su contenido volumétrico de agua: a) fuerza a flexión, b) fuerza a compresión simple y c) fuerza de adherencia.	87
Fig. 48.	Relación entre las propiedades resistentes del mortero y la fuerza de adherencia de la sonda al mortero.	88
Fig. 49.	Contenido volumétrico de agua de los morteros a lo largo de los ciclos realizados.	89
Fig. 50.	Relación entre la dosificación de agua empleada y el contenido volumétrico de agua final de los morteros C, EAE, RCD y S.	89
Fig. 51.	Fuerzas de a) flexión, b) de compresión simple y c) de adherencia entre el relleno y el tubo de PEAD de los morteros sumergidos en agua y/o sometidos a ciclos de hielo-deshielo.....	91
Fig. 52.	Gráfico de probabilidad-probabilidad normal de la fuerza a flexión y compresión simple para el mortero RCD.....	92
Fig. 53.	Gráfica de probabilidad-probabilidad <i>Weibull</i> de la fuerza de adherencia para el mortero RCD.....	93
Fig. 54.	Situación de las probetas de lechada al final del ciclo de hielo nº 24 a) probetas de flexión sumergidas en agua b) probetas de flexión sometidas al daño por hielo-deshielo, c) probeta de adherencia rota debido a los ciclos de hielo-deshielo y d) detalle de la causa de su ruptura.	94
Fig. 55.	Relación entre el contenido volumétrico y la conductividad térmica medida.	95

Fig. 56.	Conductividad térmica de los morteros sumergidos en agua y/o sometidos a ciclos de hielo-deshielo.	96
Fig. 57.	Gráfica de <i>probabilidad-probabilidad Lognormal</i> de conductividad térmica para el mortero RCD.....	96
Fig. 58.	Estado de las probetas del mortero L a los 14 ciclos de hielo-deshielo: a) probeta 4 y b) probeta 6.	97
Fig. 59.	Disposición en planta de los TRTs realizados.	101
Fig. 60.	Arena de escoria <i>Linz-Donawitz</i> de granulometría 0/1 mm empleada en laboratorio (escala en cm).....	104
Fig. 61.	Arena de RCD empleado en obra de granulometría 0/2 mm (escala en cm).	104
Fig. 62.	Determinación de la conductividad térmica del mortero sumergido en agua.....	108
Fig. 63.	Perforadora empleada.	110
Fig. 64.	Introducción de las sondas en la perforación realizada.....	111
Fig. 65.	Amasadora e inyectora empleadas.	112
Fig. 66.	Esquema de funcionamiento de la amasadora e inyectora empleadas:	113
Fig. 67.	Segregación experimentada para el relleno G3.....	113
Fig. 68.	Procedimiento de inyección del relleno realizado.....	114
Fig. 69.	Disposición final en planta de los rellenos inyectados.....	115
Fig. 70.	a) Componentes principales del equipo utilizado y b) tomas eléctrica y de entrada y salida del circuito hidráulico.	116
Fig. 71.	Esquema del procedimiento de medición de los perfiles verticales de temperatura.....	117
Fig. 72.	a) Esquema de conexión hidráulica del equipo con el intercambiador ensayado, b) detalle del intercambiador previo a la conexión del equipo y c) equipo listo para la realización del ensayo.....	118
Fig. 73.	Estado de las muestras recogidas en obra previo a la realización de los ensayos.	126
Fig. 74.	Perfiles de temperatura observados en el ensayo G ₃	128
Fig. 75.	Perfil de temperatura medio para cada uno de los TRTs analizados.....	129
Fig. 76.	Relación existente entre los residuos de la potencia térmica inyectada y la temperatura ambiente para los tres ensayos realizados. Relleno G ₃	131
Fig. 77.	Residuos del ajuste de la curva de temperatura media del fluido portador de calor para el intervalo de 5-48h y la temperatura ambiente registrada durante la realización de cada ensayo.....	132
Fig. 78.	Temperatura media del fluido portador de calor medida frente a la corregida.....	133
Fig. 79.	Gráfico de <i>probabilidad-probabilidad lognormal</i> para a) conductividad térmica y b) resistencia térmica de la perforación calculada en el ensayo G ₃	134
Fig. 80.	Propiedades térmicas del intercambiador: a) conductividad térmica y b) resistencia térmica de la perforación frente a conductividad térmica saturada del relleno en laboratorio.	135
Fig. 81.	Situación de las sondas dentro de la perforación geotérmica.	137
Fig. 82.	Situación del relleno en la perforación: a) mezcla parcial del relleno con el terreno por la tendencia al colapso del mismo y b) variación de la proporción de árido resultante a lo largo de la perforación debido a la segregación experimentada por el relleno.	137
Fig. 83.	Instalación necesaria para la superposición entre la amasadora de hormigón de eje basculante (a) y la amasadora-inyectora normalmente empleada en proyectos de geotermia (b).....	147
Fig. 84.	Colocación de bridas para asegurar la correcta separación entre las sondas.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rellenos geotérmicos disponibles en el mercado según los datos observados en las páginas web oficiales.....	29
Tabla 2. Modelos de simulación usados en la actualidad.	37
Tabla 3. Características generales del cemento proporcionadas por la empresa.	44
Tabla 4. Granulometría de la arena caliza 0/2 mm resultante.....	46
Tabla 5. Granulometría de la arena silíceo 0/2 mm resultante.....	47
Tabla 6. Granulometría del filler calizo	48
Tabla 7. Resultados del test de lixiviación realizado sobre la EAE empleada.	49
Tabla 8. Granulometría de la EAE una vez tamizada.....	50
Tabla 9. Granulometría por volúmenes (en cm ³) de la EAE y el filler calizo (F) en conjunto. ...	51
Tabla 10. Especificaciones de la arena reciclada.....	52
Tabla 11. Granulometría de la arena reciclada.	53
Tabla 12. Granulometría por volúmenes del RCD y el filler calizo (F) en conjunto.....	53
Tabla 13. Propiedades del superplastificante.	54
Tabla 14. Características del recipiente empleado.....	56
Tabla 15. Dosificaciones inicialmente calculadas y las finalmente empleadas.....	67
Tabla 16. Dosificación de los rellenos empleados en el análisis de durabilidad.	72
Tabla 17. Conductividades térmicas de las partículas de árido λ_s estimadas.....	83
Tabla 18. Resultados obtenidos para las dosificaciones empleadas en función de la amasadora empleada.	86
Tabla 19. Parámetros de la distribución normal de los ensayos a flexión realizados para cada mortero.....	93
Tabla 20. Clasificación cualitativa de los rellenos evaluados.	98
Tabla 21. Características generales del cemento empleado.....	102
Tabla 22. Composición química de la escoria de acería LD empleada.	103
Tabla 23. Granulometría de la escoria LD empleada en obra.....	103
Tabla 24. Granulometría del RCD empleado en obra.	105
Tabla 25. Propiedades del retardante de fraguado empleado.	105
Tabla 26. Dosificaciones finales empleadas en obra.	106
Tabla 27. Granulometría del mortero G ₁ empleado en obra.	106
Tabla 28. Combinaciones de tiempo inicial y final analizados.	120
Tabla 29. Obtención de $\sigma(k_u, \varphi_v)$ para cada combinación de k y φ analizadas.	123
Tabla 30. Conductividad térmica de los rellenos inyectados y de las mezclas fabricadas en laboratorio.	126
Tabla 31. Flujo de calor interno terrestre estimado.	130
Tabla 32. Temperatura media del terreno sin perturbar para cada TRT realizado.	130
Tabla 33. Parámetros de cálculo empleados y estimación inicial para un intervalo de tiempo de 5 a 48h.	131
Tabla 34. Ajuste de los resultados de los TRTs a la distribución lognormal.	134
Tabla 35. Conductividad térmica del relleno medida en laboratorio y estimada a partir del software EED.	135

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES DE LA TESIS

1.1 MOTIVACIÓN: IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA

Una instalación geotérmica para la climatización de edificios mediante bombas de calor permite obtener rendimientos superiores a las bombas de calor aerotérmicas debido a que la temperatura de la fuente de calor, en este caso el terreno, se mantiene más estable que la temperatura ambiente exterior a lo largo del año. De hecho, la *Environmental Protection Agency* (EPA) la declaró como el sistema de climatización más eficiente disponible [1-3]. Además, la geotermia es una fuente de energía declarada renovable por la directiva Europea 2009/28/CE [4], por lo que presenta un gran potencial de expansión en España dado que el Código Técnico de Edificación obliga a la implantación de fuentes de energía renovables para la obtención de agua caliente sanitaria en toda nueva edificación [1].

La implantación de sistemas de climatización geotérmicos mediante bombas de calor está ampliamente extendida en el mundo. Su implantación crecía en un ratio anual del 18-20% en el año 2010, lo que indica su alto potencial de expansión. De los 3 millones de instalaciones realizadas a nivel mundial, la mayoría se encuentran en Estados Unidos, China y Europa. Solamente en Europa se habían realizado ya más de 900.000 instalaciones hasta el año 2009 [5]. En España, la implantación de estos sistemas cuenta con un gran potencial de aplicación como indica la evolución de las instalaciones realizadas en la última década, únicamente frenada por la crisis económica actual [6].

Al igual que en las bombas de calor aerotérmicas, pero con un consumo menor de energía eléctrica, la bomba de calor geotérmica permite invertir el flujo térmico natural y extraer o inyectar la energía térmica renovable almacenada en el terreno para su uso en climatización de recintos. Debido a la mayor estabilidad de las temperaturas de funcionamiento, la bomba de calor geotérmica trabaja más tiempo en su régimen óptimo, mejorando la eficiencia del sistema de climatización. La principal diferencia frente a los sistemas aerotérmicos radica en que el sistema intercambiador de calor se encuentra enterrado en el terreno, lo que aumenta de manera significativa la inversión económica inicial necesaria en este tipo de instalaciones.

De todos los sistemas de intercambio de calor geotérmicos existentes, los sistemas verticales de lazo cerrado son los que mayor potencial de uso presentan por su alta eficiencia y escasa ocupación en planta [3]. Un intercambiador vertical de lazo cerrado está compuesto por un circuito de tuberías cerrado que, introducido en una perforación vertical, intercambia calor con el terreno a partir de un fluido portador de calor que circula por su interior. Para asegurar la estabilidad de la perforación se emplea un relleno geotérmico que, a su vez, hace de medio transmisor térmico entre las sondas intercambiadoras de calor y el terreno.

El principal inconveniente que presentan este tipo de instalaciones es la elevada inversión económica inicial necesaria para su implantación, debido a los costes de construcción del intercambiador geotérmico [3]. Por lo tanto, para que estos sistemas sean más competitivos es necesario disminuir el coste de la instalación realizada en el terreno. Para ello, existen dos alternativas complementarias entre sí: reducir los costes de perforación y aumentar la eficiencia por metro lineal de intercambiador.

En función del terreno existente y de la eficiencia térmica del intercambiador se puede adecuar el diseño de la instalación para reducir los costes de perforación. De esta manera, para una misma longitud total de intercambiador requerida, existe la posibilidad de aumentar la profundidad y reducir el número de perforaciones o viceversa. La estrategia a seguir depende, además, de la experiencia del constructor y de las propiedades térmicas, mecánicas e hidrogeológicas de los diferentes estratos de terreno atravesados en cada caso. Sin embargo, independientemente del tipo de terreno, equipos disponibles o experiencia del constructor, existe la posibilidad de reducir la longitud de intercambiador necesaria hasta un 25% aumentando la eficiencia térmica del relleno geotérmico empleado [7].

Los rellenos existentes en el mercado se basan en la utilización de materiales de construcción comunes como cemento, bentonita, arena silíceo, cuarzo o el propio material extraído de la perforación [8]. Sin embargo, no se han encontrado rellenos realizados a partir de otros áridos, ya sean naturales o reciclados.

La preparación del relleno en seco se podría llevar a cabo en planta, siendo transportado posteriormente a obra para su mezcla in situ. Si bien el coste de producción del relleno no es significativo por el tipo de material empleado, su transporte podría resultar costoso si existiera una gran distancia a la obra. Por lo tanto, es recomendable que el relleno se confeccione en plantas cercanas al lugar donde se realiza la obra. Estas fábricas pueden no contar con los áridos comúnmente empleados con lo que su encargo puede encarecer el producto final. Sin embargo, si se emplean los áridos ya disponibles en planta, su coste de producción disminuye significativamente.

La investigación que da lugar a esta tesis ha sido posible gracias a la financiación del proyecto de investigación titulado “*Investigación y desarrollo de sistemas de captación de energía geotérmica utilizando nuevos materiales de relleno*”, realizado en GITECO junto a Contratas Iglesias, S.A. e Impulso Industrial Alternativo, S.A.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es analizar la posibilidad de uso de diferentes áridos naturales y reciclados como árido para la fabricación de morteros autocompactantes empleados como relleno geotérmico. En particular, se pretende realizar un seguimiento de los rellenos planteados desde su diseño y caracterización en laboratorio hasta su disposición final en obra, analizando su influencia en el rendimiento final del intercambiador geotérmico ensayado. Para ello, se ha planteado el uso de dos áridos naturales (arena sílicea y arena caliza) y dos áridos reciclados (escoria de horno de arco eléctrico y residuos de construcción y demolición).

Los objetivos establecidos para dar respuesta al objetivo principal de esta tesis son los siguientes:

- Determinar las dosificaciones que dan lugar a la obtención de morteros autocompactantes en los que se emplea un único árido como base.
- Analizar la influencia del tipo y proporción de árido empleado en las propiedades físicas, térmicas y resistentes del mortero endurecido resultante.
- Determinar la durabilidad frente a la acción del hielo de los morteros evaluados en laboratorio.
- Diseñar y calcular cuatro dosificaciones de morteros autocompactantes a emplear en obra como relleno geotérmico, utilizando para cada uno un único árido de los propuestos.
- Analizar la influencia del tipo de relleno empleado en la eficiencia de un intercambiador geotérmico, así como su repercusión en la conductividad térmica estimada a partir del test de Respuesta Térmica.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El documento que se desarrolla para dar respuesta a los objetivos establecidos se divide en cinco capítulos que se describen a continuación.

En el primer capítulo se exponen las razones por las que se considera necesaria una mayor investigación de los rellenos empleados en sistemas geotérmicos verticales de lazo cerrado. Además, se establece el marco sobre el cual se realiza este trabajo y se terminan estableciendo los objetivos de la investigación realizada.

En el segundo capítulo se realiza una breve descripción de los fundamentos de los sistemas geotérmicos, definiéndose el papel que representan los sistemas de intercambio de calor geotérmico como parte de la instalación final de climatización realizada. A continuación, se describen los tipos de intercambiadores geotérmicos en los que son de aplicación los rellenos geotérmicos analizados. Posteriormente, se analiza el estado de la tecnología de los rellenos hasta el momento, para lo cual se realiza un seguimiento tanto de la literatura científica disponible como de los rellenos comercializados en la actualidad. Por último, se realiza un análisis de los métodos de determinación de las propiedades térmicas que definen la eficiencia térmica de los sistemas verticales de lazo cerrado disponibles en la actualidad.

El tercer capítulo contiene la metodología llevada a cabo para la caracterización de los rellenos realizada en laboratorio, dándose respuesta a los primeros 3 objetivos establecidos. En este capítulo se describe el procedimiento seguido para la determinación de las dosificaciones que dan lugar a morteros autocompactantes válidos para su uso como rellenos geotérmicos, de los cuales se seleccionan los rellenos que mejores prestaciones térmicas presentan para su posterior uso en obra. Posteriormente, partiendo de las dosificaciones obtenidas del apartado anterior, se analiza la influencia de la acción tanto del hielo como del agua en las características físicas, térmicas y resistentes evaluadas anteriormente. De forma complementaria, se analiza la resistencia de adherencia en la superficie de contacto entre el mortero y la sonda, para estudiar el posible deterioro de la instalación debido a los ciclos térmicos que ésta aplica sobre el relleno.

El cuarto capítulo presenta el trabajo realizado para dar respuesta a los requisitos impuestos durante la realización de la obra en la que se basa esta investigación, dando respuesta a los últimos dos objetivos establecidos. En primer lugar, se adaptan las dosificaciones obtenidas previamente en laboratorio para su uso en obra, y se realiza una caracterización de los rellenos en laboratorio similar al comentado en el capítulo anterior. A continuación, se explica la metodología empleada en la construcción de los intercambiadores geotérmicos y en la realización e interpretación

de los ensayos realizados in situ que permiten la determinación de la influencia del relleno en la eficiencia de la instalación.

Por último, el quinto capítulo recoge las conclusiones obtenidas del trabajo realizado, así como las futuras líneas de investigación que pueden surgir a partir del mismo.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 ENERGÍA GEOTÉRMICA: CLASIFICACIÓN DE USOS

El tipo de aprovechamiento de la energía térmica almacenada en el terreno, más conocida como energía geotérmica, depende en gran medida de la temperatura a la que se encuentre la fuente de calor. En la actualidad, existen dos alternativas a la hora de clasificar los sistemas de aprovechamiento de la energía geotérmica, basadas bien en la temperatura del terreno o bien en la transformación de la energía realizada.

La primera alternativa clasifica los sistemas en función de la temperatura del terreno con el que intercambia energía. La variación de la temperatura del terreno con la profundidad provoca la búsqueda de diferentes aprovechamientos de la energía geotérmica. Como consecuencia, se diferencian cuatro grupos en función de la temperatura de captación de la energía geotérmica: de alta temperatura para valores superiores a 150°C; de media temperatura para valores de entre 90-150°C; de baja temperatura para valores comprendidos entre 30 y 90°C; y de muy baja temperatura, para temperaturas menores de 30°C.

La Fig. 1 presenta los múltiples usos que permite la energía térmica en función de la temperatura del medio de extracción [9]. Puede observarse que, aunque los usos están claramente diferenciados por la temperatura, es muy compleja la diferenciación en grupos sin crear solapes entre los mismos.

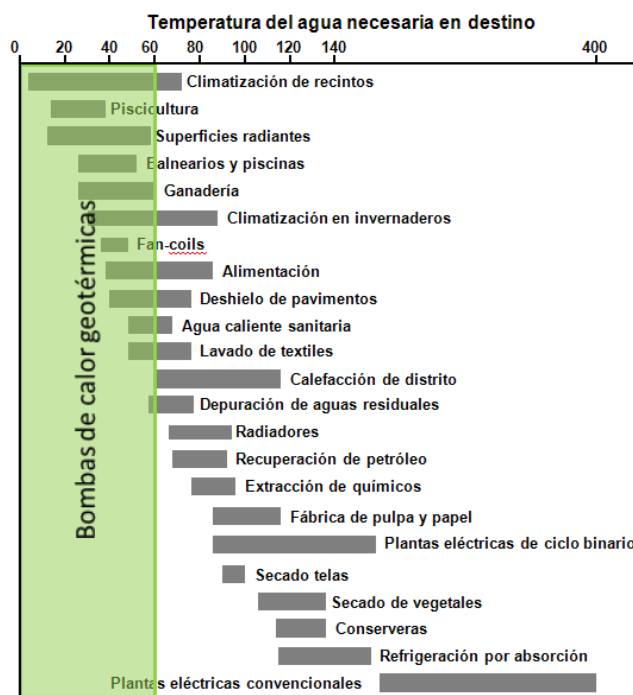


Fig. 1. Posibles usos de la energía geotérmica en función de su temperatura

La segunda alternativa clasifica los sistemas en función de la transformación realizada a la energía para posibilitar su uso [10]. El uso directo permite aprovechar la energía térmica almacenada sin realizar ningún tipo de transformación. En el uso indirecto, la energía térmica del suelo se transforma en electricidad para su posterior uso.

Aunque ambas clasificaciones son muy buenas para diferenciar a grandes rasgos los diferentes aspectos que contempla la geotermia, durante la lectura se ha considerado que ambas tienen algunos aspectos mejorables. En la clasificación por temperaturas, es sencillo separar los sistemas de aprovechamiento de alta temperatura del resto. Sin embargo, no está muy clara la diferencia entre la media y la baja temperatura, ya que aunque la temperatura de entrada no sea la misma, las aplicaciones encontradas son similares. La clasificación de uso directo-indirecto adolece, por otra parte, de que dentro del uso directo se engloban las bombas de calor, que aprovechan el poder térmico del suelo mediante una máquina que permite el intercambio de energía; por lo tanto, su uso no es estrictamente directo. No obstante, cabe resaltar que mediante el uso de las bombas de calor se pueden cubrir numerosos usos que abarca el uso directo, aunque con peor rendimiento.

Para generación de electricidad, es necesario que el agua subterránea se encuentre a una alta presión y temperatura, para que la pérdida de presión convierta el agua en vapor y así poder generar electricidad a su paso por una turbina. Todo ello implica la construcción de perforaciones de gran profundidad. Sin embargo, tanto para el uso directo como para el aprovechamiento mediante bombas de calor la profundidad necesaria es significativamente menor, por lo cual los intercambiadores de calor pueden ser similares.

2.2 ENERGÍA GEOTÉRMICA MEDIANTE BOMBAS DE CALOR

Como cualquier instalación térmica basada en el funcionamiento de una bomba de calor, la instalación que permite el aprovechamiento de la energía geotérmica almacenada en el terreno consta de tres componentes claramente diferenciados: el sistema de climatización interno del edificio, la bomba de calor geotérmica y el sistema de captación de energía geotérmica (Fig. 2).

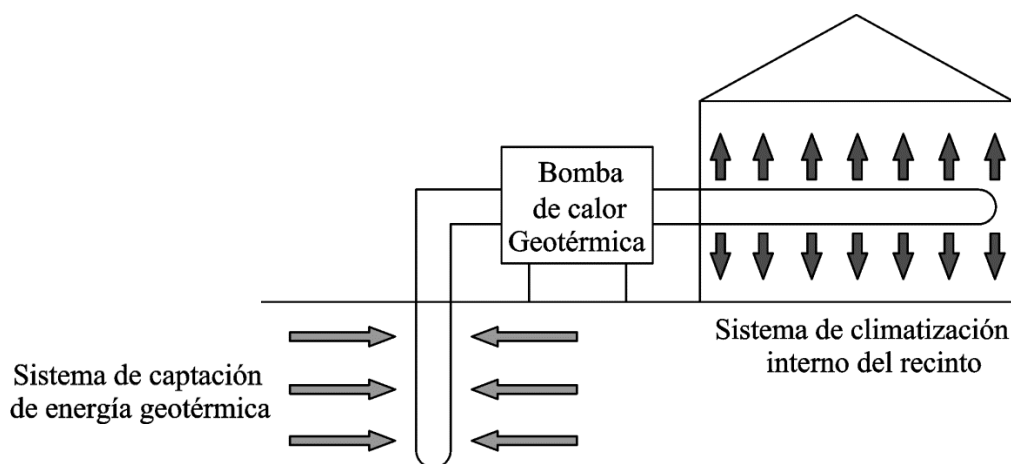


Fig. 2. Componentes principales de una instalación de aprovechamiento de la energía geotérmica mediante bombas de calor.

2.2.1 SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN INTERNO DEL RECINTO

Se trata de un circuito hidráulico que intercambia calor con el medio a climatizar. Debido a la gran variedad de posibles aplicaciones de estas instalaciones, el sistema de climatización instalado en el medio presenta una gran variabilidad. A continuación, se explican de manera concisa los más empleados y/o los que mayor potencial de ahorro presentan.

1. **Emisores de aire:** constan de un circuito de tuberías que distribuye aire por todo el recinto, emitiendo aire a la temperatura deseada y absorbiendo el que se encuentra en el medio a climatizar. Por lo tanto, el intercambio con el medio es directo.
2. **Fan coils:** aunque el circuito de distribución-recolecta de calor a cada uno de los recintos a climatizar contiene agua, el intercambio final de calor con el medio se realiza a partir del “soplado” de las tuberías para climatizar el aire del recinto. La Fig. 3 muestra un esquema aclaratorio del sistema de soplado en el que se basan los fan coils.

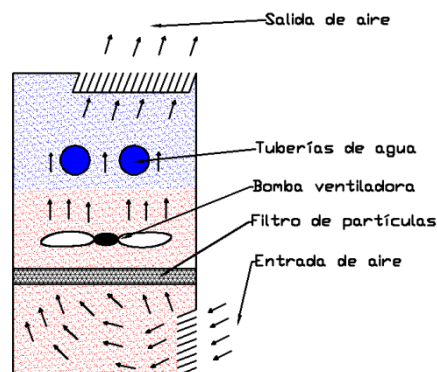


Fig. 3. Esquema simplificado del funcionamiento del Fan-coil

3. **Suelo radiante o superficies radiantes:** al igual que en los fan coils, el fluido encargado de la distribución del calor es el agua. Sin embargo, el circuito se encuentra instalado dentro de las superficies del recinto (suelo, paredes o techo) y el intercambio final con el recinto se realiza por convección y radiación en la superficie de contacto con el aire del recinto.
4. **Radiadores de agua:** se trata del sistema más implantado en la actualidad para calefacción de edificios. En este caso, el fluido portador de calor es en la mayoría de los casos agua, la cual intercambia calor con el recinto mediante radiación en unos paneles específicamente instalados. Debido a la menor superficie radiante, la temperatura necesaria en el fluido para calentar el espacio es mayor a la requerida en cualquiera de los sistemas anteriores, por lo que no es recomendable su uso en sistemas geotérmicos. Además, si se

desea también refrigeración, se debería instalar otro sistema adicional a escoger de los anteriormente explicados.

- 5. Emisores de agua:** se trata de un sistema de distribución similar al emisor de aire, si bien en este caso se usa agua como fluido portador de calor. Este sistema es muy empleado en aquellos casos en los que se climatizan masas de agua: balnearios, acuarios, piscinas, etc.

Por otra parte, independientemente del tipo de distribuidor escogido, la energía geotérmica permite la obtención de Agua Caliente Sanitaria (ACS) en aquellos casos en los que sea necesaria. Debido a los 60°C de temperatura necesarios para el ACS, se requiere un aporte de energía extra que se obtiene de diferentes maneras en función de la bomba de calor empleada [11]. Con un adecuado diseño y si las condiciones particulares lo permiten, es posible la obtención de ACS sin coste alguno en modo refrigeración, aumentando así la eficiencia del sistema.

Durante el dimensionamiento de una instalación, el primer paso es determinar las solicitudes térmicas que tendrá el edificio y el tipo de sistema de climatización interno escogido. Como resultado, se obtienen la potencia y la demanda térmica requeridas en la instalación, que son los parámetros necesarios para realizar el dimensionamiento de la bomba de calor.

2.2.2 BOMBA DE CALOR

La bomba de calor es un aparato ampliamente empleado para refrigeración, o incluso para climatización de edificios.

Su funcionamiento es el siguiente: se extrae calor de un foco frío para expulsarlo a un foco caliente a partir de la realización de un trabajo, que normalmente repercute en un consumo eléctrico. Su funcionamiento interno puede resumirse en las fases siguientes (Fig. 4), correspondientes al paso del fluido frigorífico a través de los componentes de la máquina [11]:

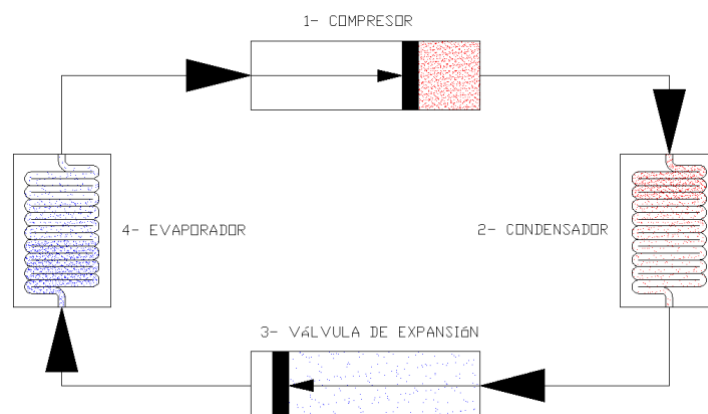


Fig. 4. Esquema simplificado de una bomba de calor.

1. **Compresor:** comprime el vapor refrigerante aumentando de esta manera su presión y temperatura.
2. **Condensador:** cede el calor concentrado con el compresor en el condensador, con lo que el vapor refrigerante cambia al estado líquido.
3. **Válvula de expansión:** expande el líquido evaporándolo, debido a la caída en la presión provocada.
4. **Evaporador:** se absorbe el calor necesario para la evaporación del líquido refrigerante.

La bomba de calor geotérmica permite el aprovechamiento de la energía de muy baja temperatura contenida en el terreno, permitiendo la climatización del recinto con una alta eficiencia. Como las bombas de calor empleadas para otras aplicaciones, la bomba de calor de un sistema de climatización geotérmico cuenta con una válvula de 4 vías que permite invertir su funcionamiento (Fig. 5):

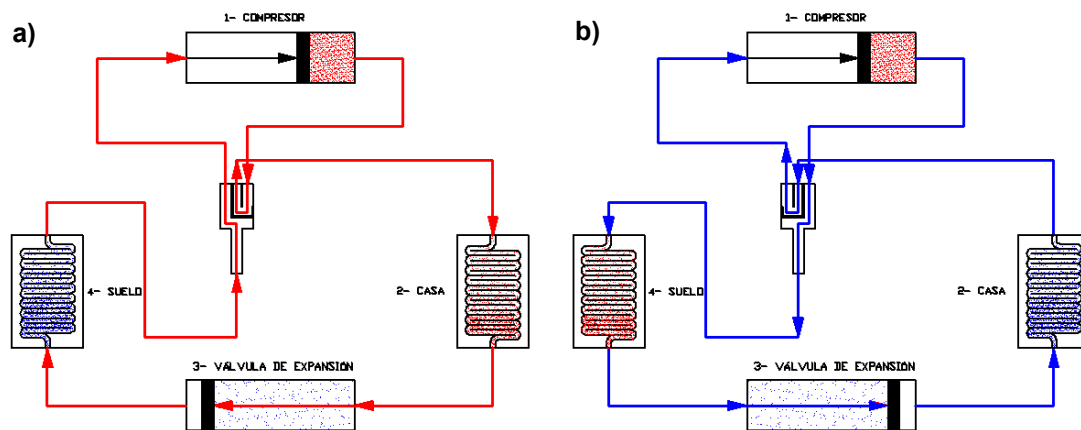


Fig. 5. Circuito en modo a) calefacción y b) refrigeración.

Durante el invierno (Fig. 5a), la bomba de calor permite que el intercambiador geotérmico absorba calor del terreno y que el sistema de distribución del recinto disipe el calor generado en el compresor. Sin embargo, mediante una válvula de 4 vías (Fig. 5b) se consigue invertir las posiciones del intercambiador geotérmico y del recinto, permitiendo el funcionamiento del sistema en modo refrigeración.

Existen cuatro tipos de bombas de calor geotérmicas que vienen determinados por el fluido portador de calor empleado en los sistemas de climatización del recinto y en el sistema de captación de energía geotérmica escogidos: agua-agua, aire-aire, agua-aire o aire-agua.

La selección de la bomba de calor se realiza en base a la potencia y demanda térmica requerida. Como consecuencia, el propio equipo establece los caudales y el rango de temperaturas del foco frío y el foco caliente durante su funcionamiento en modo calefacción y modo refrigeración. De todas las bombas de calor válidas, se escogerá aquella que maximice el rendimiento de la instalación. Como resultado, la bomba de

calor proporciona las temperaturas máxima (verano) y mínima (invierno) y la potencia térmica que es necesario suministrar por el sistema de captación de energía geotérmica.

2.2.3 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA

Los sistemas de captación de energía geotérmica permiten aprovechar la gran inercia térmica del terreno para almacenar calor o frío de una estación a otra y así mejorar la eficiencia del sistema de climatización significativamente. En la actualidad, existen una gran variedad de sistemas disponibles. La Fig. 6 muestra la clasificación más empleada según la bibliografía consultada [2,3,11-13].

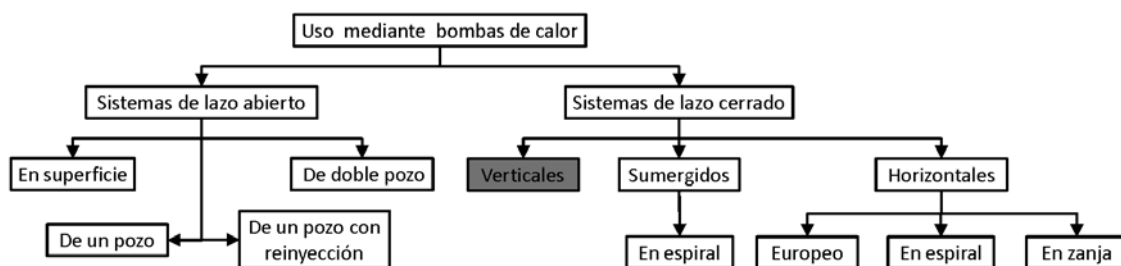


Fig. 6. Clasificación de sistemas geotérmicos mediante bombas de calor.

2.2.3.1 Sistemas de lazo abierto

Los captadores de lazo abierto forman un circuito abierto con el terreno, extrayendo agua subterránea o superficial disponible y descargándola de nuevo a los recursos hídricos cercanos (Fig. 7). El sistema abierto intercambia calor usando directamente el agua existente, ya sea subterránea (acuíferos) o superficial (lagos, estanques, piscinas, etc.). Su aplicación en sistemas de captación de energía geotérmica mediante bombas de calor está sujeta a condiciones ambientales, existiendo restricciones tanto en el caudal extraído como en su temperatura de retorno al medio.

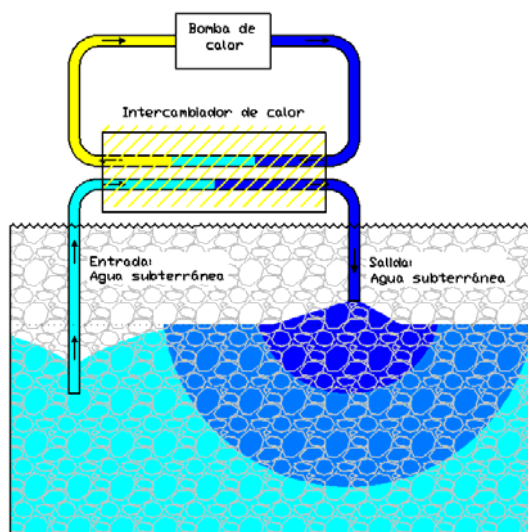


Fig. 7. Sistema geotérmico de lazo abierto.

Dentro de los sistemas abiertos, el tipo de intercambiador viene determinado por el procedimiento de extracción y devolución del agua empleada.

Los **sistemas abiertos en superficie** utilizan el agua disponible en masas de agua superficiales como piscinas, lagunas, embalses, etc., como fuente o sumidero de energía. Aunque a día de hoy no es un sistema muy implantado, estudios como el realizado por Ruiz *et al.* en el año 2008 [14] demuestran que su implantación, en el caso de las piscinas, es una opción económica y fácil de llevar a cabo. Además, el ahorro energético es doble, ya que por una parte la piscina ha de ser calentada en verano, con lo que se puede usar como sumidero del calor extraído del edificio a refrigerar en esta estación. A su vez, la piscina actúa como intercambiador de calor con el terreno (Fig. 8). Como es un sistema aplicable sólo en los casos en los que se cuente con una masa de agua superficial cercana al edificio, se prevé un uso significativamente limitado.

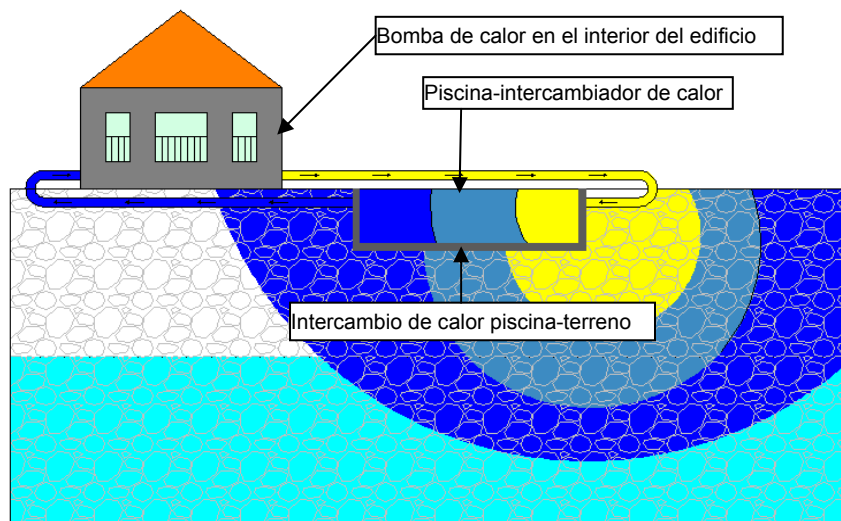


Fig. 8. Sistema horizontal de lazo abierto. Caso con una piscina.

Asimismo, la Fig. 9 muestra un esquema simplificado del **sistema de pozo único con re-inyección en superficie**. En el pozo vertical se extrae un caudal de agua subterránea que, tras su aprovechamiento energético, se vierte a ríos, lagos, etc., o se deja filtrar por el suelo si éste presenta suficiente capacidad filtrante. El gran inconveniente que presenta son los condicionantes ambientales a los que se ve expuesto entre los cuales destaca el posible agotamiento del acuífero por problemas de recarga al no reinyectarse el agua extraída.

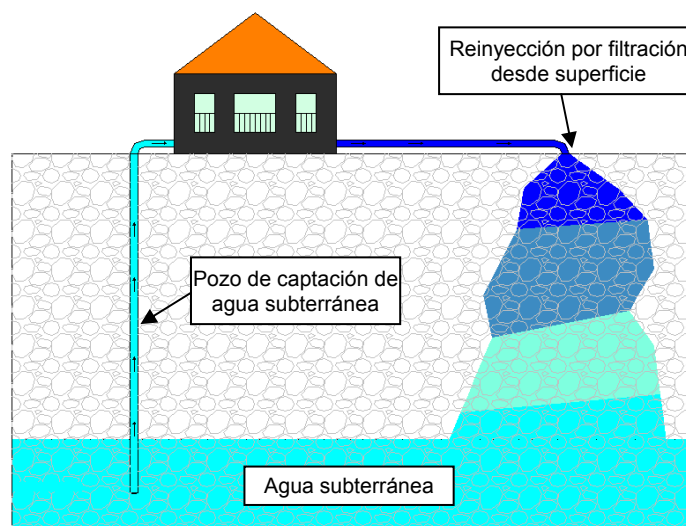


Fig. 9. Pozo único con re-inyección en superficie drenante.

El **sistema de pozo único con re-inyección** (Fig. 10) surge como solución a este problema, aunque en geotermia solo es aplicable para grandes profundidades. Consta de una única perforación en la que una bomba sumergible extrae el agua del fondo del pozo. Tras su aprovechamiento energético, el agua es reinyectada en el mismo pozo cerca de la superficie. Al re-inyectarse el agua en un punto cercano al punto de extracción, el acuífero sufrirá menos problemas de recarga, aunque el pozo deberá ser lo suficientemente profundo para que la recarga en superficie no interfiera en la temperatura de extracción.

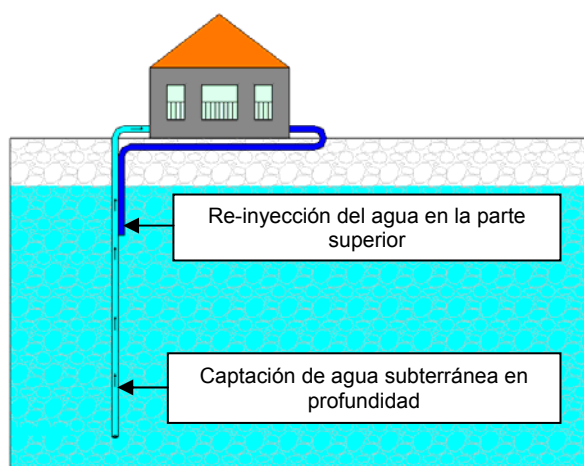


Fig. 10. Pozo único con re-inyección.

Por último, se encuentra el **sistema de doble pozo** (Fig. 11), formado por uno o varios pozos de extracción y uno o varios pozos de re-inyección. Al tratarse de pozos independientes, permite realizar la recarga del acuífero en un punto lo suficientemente lejano como para que la misma no interfiera en la temperatura de captación. En cambio, la necesidad de un mayor número de pozos hace más costosa su ejecución.

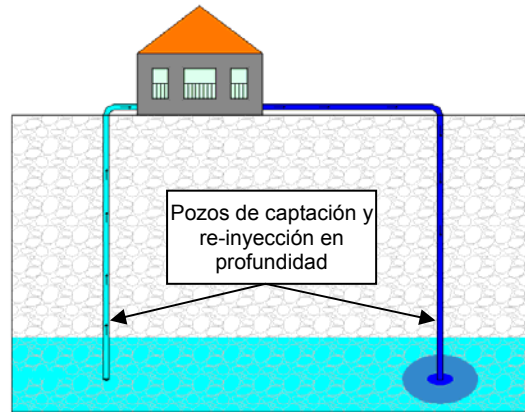


Fig. 11. Pozo doble con re-inyección en profundidad.

Debido a la falta de legislación específica para los sistemas geotérmicos abiertos en España, las instalaciones deben cumplir la legislación ambiental, y por lo tanto los mismos trámites burocráticos establecidos por la confederación hidrográfica correspondiente, para los pozos realizados con el fin de aprovechar el agua para otros usos [15-17]. Como en los sistemas cerrados no existe una legislación tan estricta dado que la afección al medio es principalmente térmica, el proceso burocrático se reduce significativamente, siendo por ello estos sistemas los más empleados en la actualidad [6].

2.2.3.2 Sistemas de lazo cerrado

Los captadores de lazo cerrado están formados por un circuito hidráulico cerrado que se encuentra enterrado en el terreno o sumergido bajo el agua (Fig. 12). Está compuesto por un sistema de tuberías por las que circula un fluido (normalmente una disolución de agua y anti-congelante) que será el encargado de intercambiar el calor con el terreno o el agua, de tal manera que el fluido no entra en contacto directo con el mismo. Los sistemas geotérmicos de lazo cerrado se clasifican de acuerdo a la geometría del intercambiador enterrado.

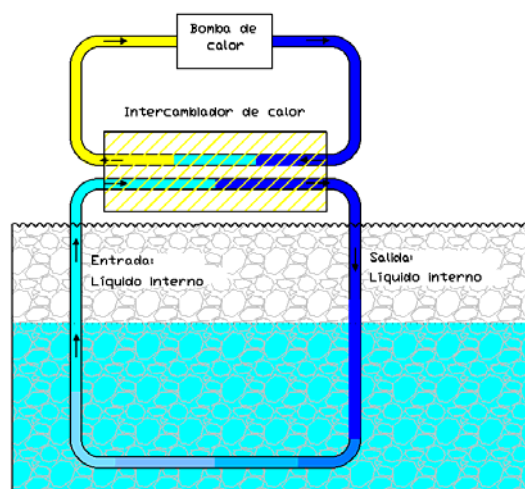


Fig. 12. Esquema simplificado de un sistema de lazo cerrado.

Los **sistemas horizontales de lazo cerrado** (Fig. 13) están formados por un sistema de tuberías que bien pueden estar enterradas a poca profundidad (1-2 m) [12] o sumergidos en grandes masas de agua. Las diferentes tipologías existentes se ordenan de acuerdo a la geometría en la que se dispone la red de tuberías [13].

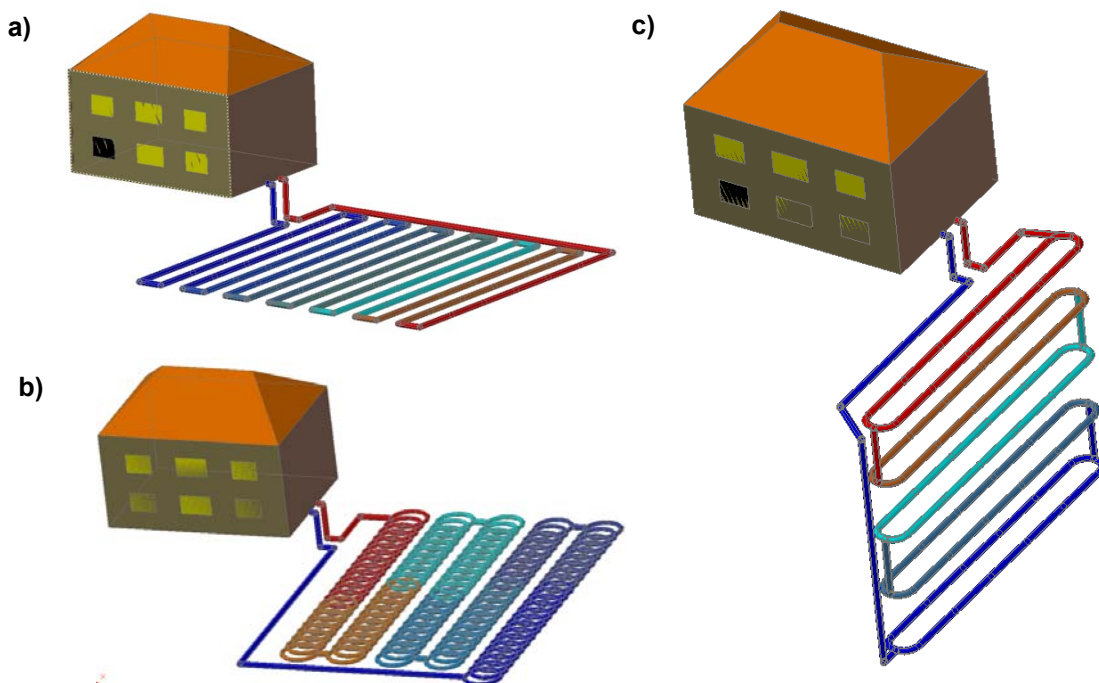


Fig. 13. Sistemas horizontales de lazo cerrado: a) convencional, b) con espirales tipo "slinky" y c) en zanja.

El sistema de tuberías en paralelo convencional (Fig. 13a) es el que más espacio horizontal ocupa de todos. El sistema de espirales (Fig. 13b) tanto verticales como horizontales ocupa menos espacio, aunque su exigencia al terreno es mayor debido a la mayor densidad de tubos del circuito, lo que puede llegar a saturar térmicamente el terreno antes que en el caso del sistema de sondas en paralelo. Además, la longitud de tubos necesaria es notablemente mayor. En cuanto a la disposición en zanjas (Fig. 13c), la ocupación de terreno es menor que en los demás sistemas, a cambio de una mayor exigencia al mismo y un mayor coste debido a la mayor profundidad requerida. Por todo ello, la elección del tipo de sistema dependerá de las propiedades mecánicas y térmicas del terreno, así como del terreno disponible y de la climatología del lugar.

Los sistemas horizontales en su conjunto no presentan grandes avances en cuanto a lo que teoría y cálculos se refiere. Prácticamente toda la documentación existente son proyectos de aplicaciones reales, en los que se sobredimensiona el sistema basándose en la experiencia adquirida de otros proyectos similares [11]. Es decir, se dimensiona y construye en base a recomendaciones, sin existir una base teórica sólida como en los sistemas verticales.

No se ha encontrado ninguna línea de investigación que trate de explicar de forma analítica la transferencia de calor en estos sistemas. Las investigaciones más representativas calculan el comportamiento del terreno mediante modelos numéricos por ordenador, contrastando los resultados con los valores obtenidos en una instalación real monitorizada. Piechowski [18] fue el primero en desarrollar un modelo numérico, sentando las bases de los desarrollados más adelante. En Turquía, tanto la *Universidad de Firat* como la de *Uludag* publicaron numerosos artículos explicando las diferentes fases que comprenden sus proyectos [19-23], en los que monitorizaron diferentes sistemas horizontales para determinar la eficiencia final del sistema. Sin embargo, no definieron los factores más determinantes a la hora de dimensionar una instalación de este tipo.

Los avances realizados en Japón y Estados Unidos son desconocidos debido a la política de privacidad seguida por los mismos, aunque en el caso de Japón se han encontrado artículos que demuestran el gran avance de sus investigaciones. En primer lugar desarrollaron un experimento que analiza la influencia de los diferentes parámetros del sistema [24] en el que establecieron que los parámetros fundamentales para determinar la eficiencia térmica del sistema geotérmico horizontal eran la conductividad térmica y el grado de saturación de agua del terreno. En segundo lugar, Hamada *et al.* [25] desarrollaron un sistema de introducción de las sondas en espiral que no precisaba excavación para su colocación. Para ello, este sistema realiza una perforación con forma de espiral de reducido diámetro. Una vez la punta de perforación vuelve a superficie, se coloca un escariador en punta, al que además se conectan las sondas para que durante la acción simultánea de extracción-escariado de la perforación (*back reaming*) se introduzca la sonda. Al final de todo el proceso, la sonda queda introducida en la perforación realizada. Finalmente, en el Reino Unido Gan *et al.* [26] emplearon un depósito de agua enterrado como posible captador horizontal.

Además de ser sistemas menos eficientes, el principal inconveniente de estos sistemas frente a los verticales es la mayor ocupación de terreno respecto a los pozos de captación verticales. Este hecho limita su uso en áreas urbanas consolidadas donde el precio del terreno es más significativo.

2.3 SISTEMA GEOTÉRMICO VERTICAL DE LAZO CERRADO

Los **sistemas verticales de lazo cerrado** intercambian el calor mediante tuberías introducidas dentro de perforaciones verticales. El circuito hidráulico está formado por uno o más pozos verticales (Fig. 14). La geometría en planta de los sistemas verticales depende en gran medida de la propia geometría de terreno disponible así como de la existencia de corrientes de agua subterránea. De manera general y en la medida de lo posible, los intercambiadores se colocan en un plano perpendicular a la dirección

principal del agua subterránea para que la afección térmica entre perforaciones sea mínima. Sin embargo, existe también la posibilidad de almacenar el calor en verano a partir de unas perforaciones situadas aguas arriba y extraerlo mediante un sistema de perforaciones situado aguas abajo. La elección del sistema depende, por lo tanto, de las propiedades hidrogeológicas del terreno, así como de la propia demanda térmica requerida por la instalación.

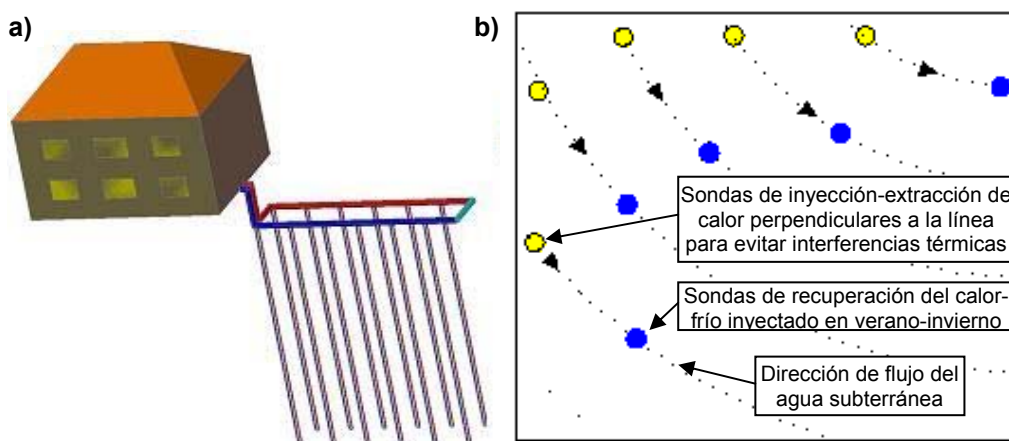


Fig. 14. Sistema vertical de lazo cerrado: a) sistema de intercambiadores vertical en perspectiva y b) ejemplo de geometría en planta que permite la interferencia mínima entre sondas y además permite el aprovechamiento inter-estacional de energía bajo la presencia de corrientes subterráneas.

Independientemente de la geometría en planta del sistema de intercambiadores verticales escogido, cada uno de los intercambiadores verticales de lazo cerrado consta de tres partes fundamentales que resulta necesario definir previo al dimensionamiento de una instalación geotérmica (Fig. 15): sonda geotérmica, relleno geotérmico y terreno existente.

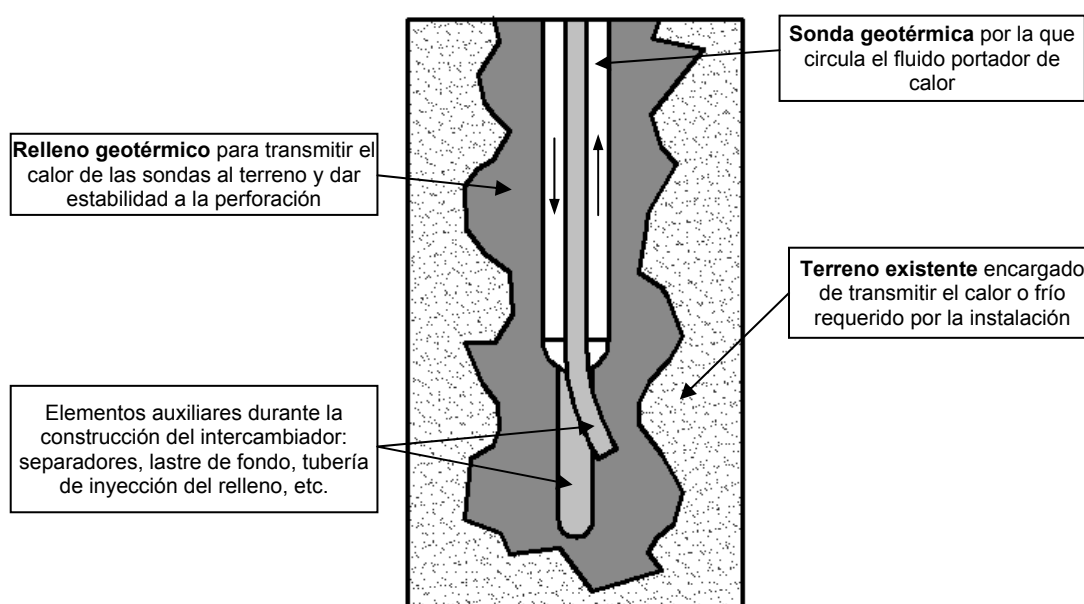


Fig. 15. Componentes de un sistema vertical de lazo cerrado.

2.3.1 SONDA GEOTÉRMICA

Constituye la parte del circuito hidráulico introducido dentro de la perforación realizada en el terreno y que permite el intercambio de calor con éste. El tipo de sonda geotérmica viene determinado en gran medida por la geometría de la perforación. Pese a que el material idóneo es el metal debido a su excelente conductividad térmica, resistencia y ductilidad, la corrosión y la dificultad de puesta en obra ha hecho del polímero el material más empleado hasta la actualidad. Dentro de las posibilidades existentes, el polímero más comúnmente empleado es el polietileno de alta densidad (PEAD), si bien el polietileno reticulado de alta densidad (PEAX) ofrece mejores prestaciones por su mayor resistencia a altas temperaturas. Determinado el material empleado para la confección de las sondas, la Fig. 16 muestra las tipologías de tubos más usadas [27].

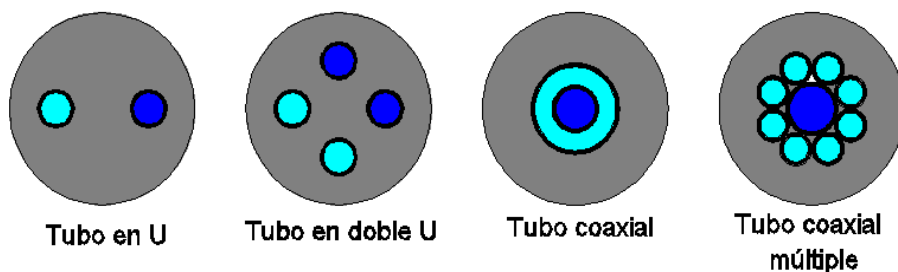


Fig. 16. Distintas secciones de tuberías posibles.

El tubo en U es el tipo de sonda más utilizado en Estados Unidos. Es la sonda más simple y presenta menor interferencia térmica entre la tubería de entrada y salida que el resto. En cambio, el sistema más empleado en Europa es el de doble U. Aunque la interferencia térmica es mayor para este tipo de sonda, se produce un mayor aprovechamiento por metro lineal de perforación, ya que el tubo en doble U reduce el valor de la resistencia térmica del relleno respecto al tubo en U en un 23-48% [28]. Dado que dentro del coste asociado a la construcción de un sistema vertical el gasto principal es la ejecución de la perforación, la idea a priori puede resultar atractiva ya que una menor resistencia térmica en la perforación reduce la longitud total de perforación necesaria. Sin embargo, se deben tener en cuenta otros factores como el mayor gasto eléctrico de bombeo para recirculación del fluido portador de calor, la mayor dificultad de colocación del relleno e incluso la capacidad de intercambio que presente el terreno existente. Según Shu *et al.* [29], la elección del tipo de sonda viene determinada por el coste de la perforación y el de la energía eléctrica de recirculación consumida por la instalación. En cada caso, es necesario realizar un estudio comparativo. Por otra parte, el tubo coaxial puede ser una opción interesante de futuro. Como principal ventaja destaca el menor diámetro de perforación necesario para su instalación. Sin embargo, exige un mayor caudal de circulación al fluido

portador de calor para mantener el flujo turbulento, lo que reduce la eficiencia final de la instalación por el aumento del gasto eléctrico de bombeo de recirculación necesario.

A efectos prácticos, las sondas geotérmicas empleadas son un elemento prefabricado. Además, su investigación está muy avanzada en la actualidad, ya que únicamente se trata de una nueva aplicación de tuberías destinadas ya a otros usos, con lo que se trata de una tecnología de polímeros ya existente.

2.3.2 RELLENO GEOTÉRMICO

El relleno geotérmico proporciona un medio continuo entre las sondas captadoras del calor y el terreno existente. Las condiciones particulares que debe cumplir el relleno geotérmico durante su puesta en obra y su posterior funcionamiento como parte de la instalación determinan las propiedades que debe presentar el relleno a corto y largo plazo.

A corto plazo el relleno debe:

- Ser lo suficientemente fluido como para permitir su inyección en el interior de la perforación.
- Tener una densidad superior a la de los lodos de perforación existentes en la perforación para que pueda extraerlos sin mezclarse y así rellenar la perforación.
- Ocupar todo el hueco existente entre las paredes de la perforación y las sondas sin ningún aporte externo de energía de compactación.

Por otra parte, se recomienda que a largo plazo el relleno cumpla con las especificaciones establecidas por la *International Ground Source Heat Pump Association* (IGSHPA) [30] y la norma *VDI 4640* [27]:

- Proporcionar estabilidad a la perforación durante la vida útil de la instalación.
- Resistir esfuerzos térmicos y mecánicos debidos a la propia sollicitación térmica de la instalación geotérmica o la presencia de cimentaciones cercanas.
- Evitar la infiltración de aguas subterráneas entre capas.
- Hacer de medio transmisor del calor entre la sonda y el suelo.

Por todo ello, los rellenos más empleados se pueden clasificar en dos grandes grupos en base al principal material empleado para su confección:

- **Rellenos basados en lodos tixotrópicos.** Agrupa a todos los rellenos que se realizan con bentonita como material principal.
- **Rellenos basados en materiales con hidraulicidad latente.** Agrupa a todos los rellenos cuyo componente principal es el cemento.

2.3.2.1 Rellenos basados en lodos tixotrópicos

Los materiales tixotrópicos como la bentonita presentan un comportamiento pseudoplástico y no-Newtoniano en el que la viscosidad depende del esfuerzo de corte aplicado sobre el mismo. Al detenerse las labores de perforación, la viscosidad de los lodos tixotrópicos aumenta significativamente comportándose como un sólido plástico. Sin embargo, al reanudar las labores de perforación el esfuerzo de corte realizado por la perforadora provoca la pérdida de viscosidad del lodo. Por todo ello, se trata de un material ampliamente empleado fundamentalmente para la construcción de obras subterráneas para la contención de la perforación, para posibilitar la extracción del material excavado y para impermeabilización posterior de las paredes de excavación.

Dentro de los lodos tixotrópicos el más empleado es la bentonita. La suspensión de bentonita en agua fue el primer material de relleno geotérmico empleado debido a la facilidad constructiva que otorga sus propiedades tixotrópicas y al amplio conocimiento de su comportamiento por las empresas perforistas. Sin embargo, su baja conductividad térmica (0,74-0,88 W/(m K) [31]) e inestabilidad volumétrica debido al cambio del contenido en agua, lejos de beneficiar a la instalación, perjudicaba la eficiencia de la misma.

Remund [32] presentó una primera mejora sobre la bentonita tradicional. Para aumentar la conductividad térmica del relleno, empleó mayoritariamente arena silíceas, en el que la bentonita aporta la impermeabilización obteniendo conductividades térmicas de hasta 1,47 W/(m K) [33]. A continuación, Smith y Marvin [7] emplearon las diferentes proporciones de arena propuestas por Remund [33] para mejorar la conductividad térmica de los rellenos y comprobaron in situ en diferentes terrenos su influencia en la longitud de perforación requerida, aumentando la potencia de calor disipada por unidad de longitud en hasta el 25%, valor que fue confirmado un año más tarde en el estudio realizado por Carlson [34].

Más recientemente, las propuestas de mejora de este tipo de rellenos se centraron en los trabajos realizados por Lee *et al.* [31] y Delaleux *et al.* [35]. En primer lugar, Lee *et al.* [31] analizaron, para 7 bentonitas diferentes, la influencia de la adición tanto de arena silícea como de grafito en la viscosidad de mezcla, en la conductividad térmica y en la estabilidad volumétrica de rellenos bentoníticos. Dos de las bentonitas empleadas ya se habían mejorado previamente para su uso en geotermia mediante el aumento de proporción de montmorillonita y cuarzo. En primer lugar, analizaron la reología de las mezclas mediante un viscosímetro, si bien no establecieron ningún valor concreto que asegurara su bombeabilidad y por lo tanto su puesta en obra. Destacaron que tanto la arena silícea como el grafito aumentaban significativamente la viscosidad y la conductividad del relleno. Sin embargo, el aumento en la conductividad térmica experimentado debido a la adición de grafito fue significativamente mayor que

el aportado por la arena silícea: la conductividad térmica del relleno resultante en el caso de añadir grafito fue de hasta 3 W/(m K), mientras que en el caso de la arena silícea solamente se alcanzaron 1,4 W/(m K). En cuanto a la estabilidad volumétrica, en primer lugar analizaron la expansividad de las bentonitas empleadas, para luego analizar su retracción debida a la exposición al agua salada. Según los resultados obtenidos, cuanto mayor contenido de montmorillonita presente la bentonita, mayor es su expansividad y menor es la retracción, por lo que recomendaron el uso de bentonitas con alto contenido en montmorillonita. Un año más tarde, Fabian Delaleux *et al.* [35] ahondaron más en el uso del grafito analizando la influencia de diferentes formas estructurales de grafito en la conductividad térmica final del relleno bentonítico. Basándose en un estudio de rellenos destinados al sellado de almacenes de residuos radiactivos realizado por Jobman *et al.* [36], determinaron que el uso de grafito natural expandido y posteriormente comprimido permitía obtener rellenos con conductividades térmicas próximas a 5 W/(m K). Sin embargo, también observaron que la conductividad del mismo relleno en seco se reducía a 1,5-2 W/(m K) debido a la gran retracción de la mezcla. Si bien en todo caso los valores observados se encuentran dentro del rango de conductividades térmicas recomendado por Lee *et al.* [31] y Fernández *et al.* [8], no se cuantificó su influencia real en la resistencia térmica de la perforación, ya que no se midió la retracción de volumen del relleno y el consecuente aumento de la resistencia térmica de contacto sonda-relleno generada.

2.3.2.2 Rellenos basados en materiales con hidraulicidad latente

En paralelo a los trabajos realizados con rellenos bentoníticos, se analizó la posibilidad de uso de rellenos que emplean cemento como material fundamental.

En primer lugar, Allan *et al.* [37-44] analizaron en profundidad la posibilidad de uso de lechadas de cemento y la adición de arena silícea para la confección de morteros autocompactantes para su uso como relleno geotérmico.

En cuanto a la lechada de cemento, estos autores [37-44] determinaron que una disminución de la cantidad de agua en la mezcla mejoraba las propiedades a largo plazo del relleno: aumento de la resistencia mecánica, de la conductividad térmica y de la adherencia del mismo a la sonda junto a una disminución de la permeabilidad al agua. Además, la lechada de cemento amasada con un contenido de agua respecto al cemento en peso de 0,4 presentó una conductividad térmica saturada de agua similar a la del relleno de bentonita convencional: 0,80-0,87 W/(m K) frente a la de la bentonita, que fue de 0,75-0,80 W/(m K). La lechada presentó una reducción de conductividad térmica del 19% debido al secado en estufa realizado, mientras que no se facilitaron los valores obtenidos en el caso de la bentonita.

Por otra parte, mediante la adición de arena sílicea, los morteros autocompactantes resultantes mejoraron notablemente su conductividad térmica respecto a la lechada de cemento, obteniendo resultados en seco-saturado de 2,16-2,53 W/(m K), claramente superiores a los obtenidos para la mejor de las lechadas de cemento analizadas. Finalmente, Allan *et al.* [45] concluyeron que el mortero autocompactante fabricado a base de arena sílicea era válido para su uso como relleno geotérmico.

Tomando como punto de partida el trabajo realizado junto a Allan *et al.* [45], Philippacopoulos y Berndt [46] desarrollaron un modelo numérico que permitía estimar el comportamiento térmico en el caso del despegue del tubo con el material de relleno y el relleno con el terreno. En los resultados obtenidos se observó un salto térmico claro en la zona donde se daba el despegue de la sonda respecto al relleno, razón por la cual el flujo de calor en el sistema resultó claramente reducido. Como conclusión, establecieron que la adherencia de la sonda es de vital importancia en la eficiencia final de la perforación, debiéndose evitar rellenos que sufran retracciones significativas. Así, según los mismos autores, un despegue total de la sonda respecto al relleno provocaría una reducción del 66% en la capacidad portante de la perforación. A su vez, establecieron que la transferencia de calor de los captadores es mejor con materiales de relleno que presentan una conductividad térmica mayor o igual a la del terreno.

Al mismo tiempo, Fu y Chung [47] determinaron que el humo de sílice, el látex y la metilcelulosa reducen la conductividad térmica de la lechada y aumentan su calor específico, mientras que las fibras de carbono no aumentan la conductividad térmica en contra de lo esperado. Yunsheng y Chung [48] mejoraron la conductividad térmica y el calor específico de la lechada de cemento en un 38% y un 50% mediante la adición simultánea de humo de sílice y amino vinil silano en base acuosa. Por último, determinaron al igual que Allan *et al.*, [45] que la arena sílicea aumenta la conductividad térmica del mortero resultante respecto a la lechada de cemento de referencia y disminuye su calor específico [49].

A partir de esa fecha no se ha encontrado ninguna referencia bibliográfica que ahonde específicamente en este tipo de rellenos geotérmicos. La bibliografía encontrada que podría ser de aplicación en el ámbito de la geotermia se centra en el desarrollo de morteros y hormigones para otros usos. En función de la aplicación a la que esté destinado el hormigón o el mortero, las propiedades térmicas perseguidas por el mismo varían significativamente. En todos los casos encontrados, el aumento o disminución de la conductividad térmica se obtiene a partir del empleo de adiciones sustitutivas del cemento o diferentes tipos de áridos.

Demirboga [50] realizó diferentes morteros en los que sustituyó parcialmente el cemento por humo de sílice, cenizas volantes o escoria de alto horno concluyendo que en todos los casos se obtenía una reducción en la conductividad térmica del mortero

resultante. Un año más tarde, Uysal *et al.* [51] analizaron la conductividad térmica de hormigones que presentaban piedra pómez como sustituto parcial de un árido natural no especificado. Para todos los grados de sustitución analizados obtuvieron una reducción de la conductividad térmica de hasta en un 46%, debido a la gran porosidad de la piedra pómez empleada.

Más recientemente, Bentz *et al.* [52,53] analizaron las propiedades térmicas de morteros con arena silíceo y hormigones con árido calizo, determinando la alta influencia de los áridos en la conductividad térmica del mortero y hormigón resultante. Si bien las conductividades térmicas obtenidas en los hormigones confeccionados con árido calizo fueron menores a la obtenida en los morteros de arena silíceo, los resultados indicaron el potencial de uso de la caliza como árido en rellenos geotérmicos.

Más tarde, Alani *et al.* [54] analizaron la posibilidad de reciclar cristales como árido en revestimientos de hormigón. La conductividad térmica resultante fue inferior a la del hormigón de referencia, descartándose de esta forma su uso en rellenos geotérmicos.

2.3.2.3 Rellenos actualmente disponibles en el mercado

La Tabla 1 muestra un resumen de los rellenos geotérmicos comerciales más comunes disponibles en la actualidad. En el mercado existen numerosas empresas que ofertan pellets de bentonita convencional sin mejorar térmicamente, por lo que no se incluyen en la Tabla 1.

En primer lugar, la Tabla 1 muestra el único pellet comercializado que ha sido mejorado térmicamente con grafito. A continuación, se presentan todos los rellenos basados principalmente en bentonita, sin la adición de materiales con hidraulicidad latente. Todos ellos aumentan la conductividad térmica del relleno a partir de la mezcla de bentonita con arena silíceo o de cuarzo, lo que concuerda con los estudios realizados por Remund [33], Lee *et al.* [31] y Delaleux *et al.* [35].

Por último, en la misma tabla se han incluido también los morteros empleados como rellenos que adquieren cierta resistencia a compresión dado su contenido de cemento y otros materiales con hidraulicidad latente. Los morteros ofertados no muestran la dosificación del producto, algunos incluso ni siquiera mencionan los componentes del mismo. Sin embargo, entre los morteros en los que sí se indican los componentes empleados destaca el uso de arena silíceo o de cuarzo, e incluso en algunos se intuye el uso de grafito, dado que mencionan la adición de materiales sintéticos, lo que concuerda con los estudios realizados por Allan *et al.* [37,40,42,45] y Fabian Delaleux *et al.* [35].

Tabla 1. Rellenos geotérmicos disponibles en el mercado según los datos observados en las páginas web oficiales.

Marca	Nombre	Componentes/Dosificación	Tipo de árido	Conductividad térmica (W/(m K))
Pellets de bentonita				
Mikolit	Thermoseal	Pellets de bentonita + grafito	-	2,4
Rellenos geotérmicos basados en bentonita				
CETCO	Granular grout	20% sólidos: Bentonita + agua	-	0,73
		40% sólidos: Bentonita + arena + agua	-	1,22
	Geothermal grout	30% sólidos: Bentonita + agua	Silíceo	0,68
		68% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	1,69
	High TC geothermal grout	30% sólidos: Bentonita + agua	Silíceo	0,69
Baroid		72% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	2,05
	Barotherm	30% sólidos: Bentonita + agua	-	0,68
		65,1% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	1,71
	Barotherm plus	65,1% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	1,73
		70,4% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	2,08
WDS		65,1% sólidos: Bentonita + agua	-	0,69
	Barotherm gold	70,4% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	2,08
GeoPro, Inc,	Geothermal grout	58,5% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	1,54
		65,7% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	2,23
GeoPro, Inc,	TG Lite	30% sólidos: Bentonita + agua	-	0,77
		66% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	1,71
	TG Select	30,8% sólidos: Bentonita + agua	-	0,77
		71,4% sólidos: Bentonita + arena + agua	Silíceo	2,06
		45,3% sólidos: Bentonita + agua + aditivos	-	0,98
	TG Complete	71,4% sólidos: Bentonita + arena + agua + aditivos	Silíceo	2,06
	BH 20	20-25% sólidos: Bentonita + agua	-	0,72
GHP Systems	Powertec	Aditivos para aumentar la conductividad de los anteriores rellenos	-	Los mejora hasta 1,6
	Grout-Well DF Sealant	20% sólidos: Bentonita + agua	-	0,72
	Therm-ex	64% sólidos: Bentonita + agua	-	1,59
Morteros geotérmicos basados en materiales con hidraulicidad latente				
REHAU	Raugeo Therm	Bentonita + cemento + arena + agua + aditivos (No especificados)	No especificada	1,2-2,0
SupergROUTproducts	Raugeo GeoSolid		No especificada	2,35-2,40
	GEO SupergROUTs	Patente: Cemento + Cenizas volantes + agua + superplastificante	-	1,69
Energrout	HD 2,1	40,8% sólidos: Cemento sulfuroresistente + arena +aditivos (no especificados)	Silíceo	2,10
	LD 3,0	Cemento sulfuroresistente +adiciones minerales y sintéticas (no especificados)	-	3,00
INGELCO	HDF	41,6% sólidos: Cemento sulfuroresistente + arena +aditivos (no especificados)	Silíceo	2,00
	Calidutherm	Cemento + Bentonita(Montmorillonita) + arena	Cuarzo	2,00
Heidelberg Cement	Thermocem plus		-	2,00
	Thermocem light	810 kg de sólido por cada 650 kg de agua: Cemento + bentonita + aditivos+ agua	-	1,00
JND	2K Geothermal grout	No especificado	-	2,18
Stüwa	Stüwatherm	Bentonita + arena + cemento + agua + aditivos (No especificados)	Cuarzo	2,00

2.3.3 TEST DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT)

2.3.3.1 Introducción

De todos los factores que influyen en el dimensionamiento del intercambiador geotérmico, las propiedades mecánicas, hidrogeológicas y térmicas del terreno son los factores más importantes en el diseño y en la eficiencia térmica final de la instalación geotérmica.

Las **propiedades mecánicas** del terreno establecen la metodología de perforación empleada, lo que en gran medida determina el coste final por metro lineal de perforación del intercambiador geotérmico.

Las **propiedades hidrogeológicas** del terreno determinan en gran medida el comportamiento térmico del intercambiador ensayado. La presencia de agua mejora la capacidad de intercambio de calor del terreno y es un factor a tener en cuenta a la hora de determinar la geometría en planta final del campo de intercambiadores (Fig. 14). Sin embargo, la caracterización de las corrientes subterráneas es costosa y solamente se realizan ensayos in situ para el dimensionamiento de sistemas abiertos, en los que los parámetros hidráulicos son de mayor importancia.

Por último, las **propiedades térmicas** del terreno determinan la capacidad de intercambiar y almacenar calor del terreno así como la importancia de los diferentes mecanismos de transferencia de calor existentes en el mismo. Existen dos métodos principales para determinar las propiedades térmicas del terreno.

El primero de los métodos consiste en analizar en laboratorio muestras recogidas a diferentes profundidades durante la perforación. Este método permite caracterizar las unidades litológicas atravesadas, determinando la conductividad térmica y el contenido en agua en función de la profundidad de la perforación a la que se obtuvieron las muestras. En este ámbito, cabe resaltar los recientes trabajos realizados en la Universidad de Oviedo por Alonso Sánchez *et al.* [55] y Rey Ronco *et al.* [56].

El segundo de los métodos permite determinar las propiedades térmicas del terreno mediante la realización en campo de un ensayo que recibe el nombre de Test de Respuesta Térmica (TRT). Para poder realizar el TRT es necesaria la construcción de al menos un intercambiador vertical de lazo cerrado, lo que aumenta significativamente el coste del ensayo. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos se realiza el dimensionamiento inicial de la instalación, tras lo cual el intercambiador ensayado pasa a formar parte del sistema geotérmico construido, por lo que el coste del mismo atribuible al propio ensayo se reduce considerablemente.

De los dos métodos de caracterización térmica del terreno existentes, el primero prácticamente no se utiliza debido al alto coste de obtención de las muestras y a la dificultad de reproducir las mismas condiciones de campo en laboratorio. Por todo ello, el TRT es el ensayo más empleado en la actualidad para la determinación de los parámetros térmicos del terreno necesarios para el dimensionamiento de una instalación geotérmica de lazo cerrado.

Mediante un equipo especialmente diseñado para ello, a partir de la circulación de un fluido portador de calor a través del circuito hidráulico enterrado se intercambia calor con el terreno de manera controlada y se registra la evolución de temperatura del fluido con el tiempo. A partir de los datos registrados y basados en diferentes teorías analíticas o simulaciones numéricas, se realiza la interpretación de los datos obtenidos que permiten la determinación del comportamiento térmico del terreno.

2.3.3.2 Equipos empleados

Los equipos empleados para la realización de estos ensayos dependen en gran medida de las dimensiones de los sistemas geotérmicos a ensayar y de la potencia térmica de intercambio establecida. Los primeros equipos fueron diseñados simultáneamente en Suecia y Estados Unidos en 1995 [57]. Desde entonces, la mayor parte de las mejoras realizadas a los equipos se centraron en mejorar la precisión de los componentes empleados. Como mejora adicional, es necesario destacar el uso de cables-sensor de temperatura de fibra óptica por parte de Fujii *et al.* [58], ya que les permitió determinar la conductividad térmica del terreno en función de la profundidad. Sin embargo, su uso es muy limitado debido al alto coste de esta tecnología.

Cualquier equipo destinado a la realización de TRTs tiene un esquema básico similar al mostrado en la Fig. 17.

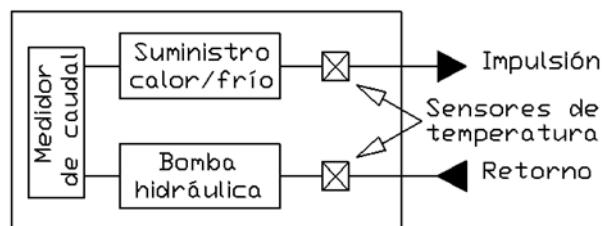


Fig. 17. Esquema básico de funcionamiento del equipo necesario para la realización de TRTs.

Como los TRTs se realizan sobre sistemas de lazo cerrado, en primer lugar el equipo debe formar un circuito cerrado con el sistema geotérmico. Por otra parte, debe contar con una bomba hidráulica que permita la circulación del fluido portador de calor a un caudal constante mínimo que asegure un régimen turbulento. La bomba hidráulica escogida en cada caso dependerá tanto del caudal requerido como de la pérdida de carga del circuito cerrado, parámetros que son necesarios tener en cuenta durante el

diseño del equipo de ensayo. En todo caso, el equipo debe ser capaz de registrar el caudal circulado y las temperaturas de impulsión y retorno del fluido portador de calor durante la duración del ensayo.

Los equipos pueden clasificarse en función del tipo de intercambio escogido para la realización del ensayo. Asimismo, la potencia térmica del equipo depende de la dimensión del intercambiador ensayado dado que durante el ensayo se debe aportar una potencia por metro de perforación similar a la que esté prevista durante el funcionamiento posterior de la instalación. El intercambio de calor con el terreno se puede realizar de tres maneras diferentes, lo que determina a su vez el tipo de suministrador de calor y/o frío empleado:

- **Con inyección de calor constante:** se calienta el fluido portador de calor a partir de resistencias eléctricas a una potencia constante conocida y se registran las temperaturas en la impulsión y en el retorno del equipo. Para asegurar un suministro constante de calor al ensayo únicamente es necesario asegurarse que el suministro eléctrico al equipo y el caudal circulado sean constantes. Es por ello que de las tres opciones disponibles es el equipo más económico y por lo tanto el más extendido.
- **Con inyección o extracción de calor constante:** su empleo fue inicialmente propuesto por Witte *et al.* [59] en el año 2002. El fluido portador de calor se calienta o enfría a potencia constante mediante una bomba de calor (geotérmica) y se registran las temperaturas en la impulsión y en el retorno del equipo. Aunque presenta la ventaja de obtener los parámetros térmicos del terreno en modo calefacción y refrigeración, debido al mecanismo de funcionamiento interno de la bomba resulta más difícil establecer una potencia constante al ensayo, lo que dificulta su realización y posterior lectura.
- **Inyección o extracción a temperatura constante:** el método fue propuesto recientemente por Wang *et al.* [60]. En este caso, se establece una temperatura constante en la impulsión del equipo y se registra la potencia térmica necesaria para ello y la evolución en la temperatura de retorno al equipo. Como principal ventaja sobre la inyección a potencia constante los autores resaltan el menor tiempo de ensayo requerido. Sin embargo, la complejidad del equipo es mayor y además es más difícil establecer la temperatura constante al ensayo, lo que dificulta su realización y posterior lectura. Es por ello que en la actualidad se sigue empleando mayoritariamente la inyección de calor constante.

2.3.3.3 *Discusión de los métodos de interpretación de los resultados existentes*

Debido al intercambio de calor, el fluido portador de calor registra una variación de temperatura entre la sonda de entrada y salida del terreno que depende tanto del tiempo de ensayo transcurrido como de las propiedades térmicas del terreno y del

sistema intercambiador ensayado. Por lo tanto, las propiedades térmicas del terreno y del intercambiador ensayado se pueden obtener mediante el ajuste de la temperatura del fluido predicha por un modelo a los datos reales de respuesta obtenidos.

Rainieri *et al.* [61] realizaron un completo resumen de todos los modelos que permiten la estimación de las propiedades térmicas a partir de los datos obtenidos en un TRT. Los modelos existentes se pueden dividir en dos grupos principales: los modelos analíticos y los modelos numéricos, si bien ambas opciones pueden resultar complementarias entre sí. Los modelos analíticos permiten la resolución directa del problema, mientras que los modelos numéricos lo hacen resolviendo por iteración las ecuaciones que gobiernan el problema.

2.3.3.3.1 Modelos analíticos

En general, los modelos que obtienen una solución analítica del problema transitorio son unidimensionales. Los modelos más importantes a destacar son la teoría de fuente lineal infinita (Infinite Line Source, “ILS”) y la fuente cilíndrica infinita (Cylinder Source Model, “CSM”). Si bien ambos problemas fueron resueltos por Carslaw y Jaeger [62], la adaptación de la ILS y CSM para la resolución de TRTs fue propuesta por Mogensen [63] y Kavanaugh y Rafferty, [64] respectivamente.

Para resolver el problema de conducción transitorio, la ILS aproxima la geometría del intercambiador geotérmico a una línea infinita en la que el flujo de calor es constante por unidad de longitud. A su vez, considera que la línea se encuentra rodeada de un medio (el suelo) homogéneo e isótropo. Bajo estas consideraciones, el problema de conducción puede considerarse radial, por lo que la ecuación transitoria de Fourier en el suelo queda de la siguiente forma (1):

$$T(r, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{terreno}}} \int_{\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

Donde,

- r es la distancia respecto a la fuente de calor lineal (m)
- t es el tiempo de ensayo transcurrido (s)
- $T(r,t)$ es la temperatura del terreno a una distancia r de la línea transcurrido un tiempo t (°C)
- q es el flujo de calor por unidad de longitud de la fuente lineal infinita (W/m)
- λ_{terreno} representa la conductividad térmica del terreno (W/(m K))
- α representa la difusividad térmica del terreno (m²/s)

Para determinar las propiedades del terreno es necesario aplicar la ecuación únicamente al terreno. De esta manera, la ecuación se resuelve para el caso en el que

la distancia respecto a la fuente de calor es el radio de la perforación (r_b). Por lo tanto, es necesario estimar la temperatura de la pared de la perforación en contacto directo con el terreno. Para ello se define el concepto de resistencia térmica de la perforación (R_b) (2):

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{q} \quad (2)$$

Donde,

- T_f es la temperatura media del fluido portador de calor (°C o K)
- T_b es la temperatura de la pared en contacto con el terreno (°C o K)
- q es el calor inyectado al terreno (W/m)

Esta constante permite tener en consideración de manera indirecta la geometría y propiedades térmicas del intercambiador. Por otra parte, se asume que la temperatura inicial sin perturbar del terreno es constante, homogénea e igual a T_0 . Bajo estas suposiciones, se obtiene la ecuación (3) propuesta por Mogensen [63]:

$$T_f(t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{terreno}}} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + q \cdot R_b + T_0 \quad (3)$$

donde,

- λ_{terreno} es la conductividad térmica estimada del terreno (W/(m K))
- t es el tiempo de ensayo transcurrido (s)
- R_b es la resistencia térmica de la perforación (m K)/W
- T_0 es la temperatura media sin perturbar del terreno (°C o K)
- α es la difusividad térmica del terreno (m²/s)
- r_b es el radio del intercambiador de calor (m)
- γ es la constante de Euler (0,5772...)

El error debido a la aproximación realizada por la ecuación (3) de la integral irresoluble de la ecuación (1), es inferior al 10% si se descartan los resultados obtenidos hasta un tiempo t que se determina a partir de la ecuación (4) [61]. Por último, la conductividad térmica del terreno y la resistencia térmica de la perforación se obtienen mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados del modelo a la temperatura registrada. Para tiempos de ensayo lo suficientemente largos, la conductividad térmica se determina a partir de la pendiente de la temperatura del fluido con el tiempo en escala logarítmica natural.

$$t \geq \frac{5 \cdot r_b^2}{\alpha} \quad (4)$$

Por su parte, y a diferencia de la ILS, la CSM permite tener en cuenta las dimensiones finitas de la perforación suponiendo que la fuente lineal infinita es un cilindro al que asigna una capacidad térmica. Esta teoría fue empleada por Shonder y Beck [65-67], y más recientemente por Fujii *et al.* [58], que basó su método en la misma teoría para determinar la conductividad térmica del terreno a diferentes profundidades mediante la medición de la temperatura del fluido a partir de sensores de fibra óptica. Sin embargo, Gehlin y Hellström [68] observaron que la teoría CSM sobreestimaba la conductividad del terreno en un 10-15% respecto al valor real del terreno, lo que no es deseable para el dimensionamiento de una instalación geotérmica.

El TRT se concibió inicialmente con el objetivo de medir la conductividad térmica del terreno a partir de la teoría ILS, adaptando la norma ASTM D-5334 a la escala de un intercambiador geotérmico. Debido a su sencillez, el modelo ILS es el que se ha empleado de manera más generalizada, como muestran los trabajos realizados por numerosos autores [68-72]. No obstante, debido a las simplificaciones realizadas, la ILS presenta una serie de inconvenientes que deben ser identificados.

En primer lugar, para la obtención de la resistencia térmica de la perforación es necesario estimar la difusividad térmica del terreno, valor que puede variar hasta en un 100% para un mismo tipo de terreno [73]. Sin embargo, Lee *et al.* [72] y Desmedt *et al.* [74] utilizaron la ILS para analizar el comportamiento térmico de diferentes rellenos y sondas geotérmicas- al realizarse todos los ensayos sobre un mismo terreno, la difusividad térmica en todos los casos era la misma y por lo tanto, no influía en la comparación entre los resultados obtenidos para cada ensayo.

Por otra parte, la suposición de que la fuente lineal es infinita también implica unas limitaciones al rango de tiempo en el que la teoría es aplicable. A largo plazo, la longitud finita de la fuente de calor hace que a diferencia de lo establecido por la ILS, el sistema alcance el régimen estacionario. Para solucionar este problema, Eskilson [69] adaptó la teoría de Fuente lineal Finita (Finite Line Source “FLS”) propuesta por Carslaw y Jaeger [62] al problema de los TRTs.

Más recientemente, Bandos *et al.* [75] integraron la solución de la FLS para toda la profundidad de la perforación, dando lugar a la ecuación (5). Esta ecuación es similar a la propuesta anteriormente por Mogensen (3) [63], a excepción de unos términos adicionales que corrigen las dimensiones finitas de la perforación y que dependen del tiempo de ensayo (t), del radio de la perforación y de su profundidad. El parámetro t_z representa el tiempo a partir del cual se entra en régimen estacionario y se calcula a partir de la ecuación (6).

$$T_m(t) = T_0 + \frac{QR_b}{H} + \frac{Q}{4\pi\lambda H} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_0^2} \right) - \gamma - \frac{3}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{4t}{t_z}} + \frac{3r_0}{H} - \frac{3}{\sqrt{\pi}} \frac{r_0^3}{H^2} \sqrt{\frac{t_z}{4t}} \right) \quad (5)$$

$$t_z = \frac{H^2}{\alpha} \quad (6)$$

Por otra parte, el tiempo de ensayo mínimo requerido para la correcta determinación de las propiedades térmicas del terreno también fue motivo de discusión. Austin *et al.* [76] determinaron una duración mínima del ensayo de 50-60h, mientras que Gehlin *et al.* [68] establecieron que el tiempo mínimo de ensayo depende de las propiedades térmicas del terreno evaluado y se puede determinar a partir de la ecuación (7).

$$t_{max} \geq \frac{50 \cdot r_b^2}{\alpha} \quad (7)$$

Si bien Witte *et al.* [59] estudiaron el tiempo de duración mínimo del ensayo necesario estableciéndolo en 50h, se percataron además de que la influencia de la temperatura ambiente era un factor de mayor importancia en la estimación de las propiedades térmicas del terreno. Recientemente, Bandos *et al.* [57,75] realizaron mejoras adicionales que permiten corregir la influencia de la temperatura ambiente independientemente del modelo empleado.

Así, en primer lugar, Bandos *et al.* [75] corrigieron las oscilaciones que sufre la temperatura media sin perturbar del terreno debido a la acción conjunta de la temperatura ambiente exterior y el gradiente térmico del terreno. Como conclusión propusieron realizar una corrección previa de las temperaturas registradas por el equipo para eliminar su influencia. En segundo lugar, basados en las pérdidas por convección de las sondas expuestas a la temperatura ambiente exterior, Bandos *et al.* [57] propusieron una serie de correcciones sobre las temperaturas registradas en el equipo que permiten aminorar las fluctuaciones que sufren las mismas debido al intercambio por convección del tramo de sondas expuesto con el ambiente exterior.

Otro factor que puede limitar la precisión de los métodos analíticos es la presencia de agua subterránea, ya que rompe la simetría radial supuesta en estos modelos. Los modelos analíticos no tienen en cuenta ni las corrientes subterráneas existentes [77] ni el flujo convectivo del agua subterránea durante la realización del ensayo [78,79]. Si bien Chiasson [80] y Sanner *et al.* [77] afirmaron que bajo corrientes subterráneas significativas el TRT sobreestimaba la conductividad térmica del terreno, Sanner *et al.* [77] indicaron a su vez que este fenómeno era detectable mediante la ILS, ya que provoca que la conductividad térmica efectiva del terreno para diferentes intervalos de tiempo sea inusualmente alta y variable. Por otro lado, Gustafsson y Westelund [78,79]

detectaron el flujo de calor por convección del agua subterránea a partir de la realización de ensayos a diferente potencia. Concluyeron que el flujo convectivo del agua mejoraba la capacidad de intercambio de calor con el terreno lo que provocó que la resistencia de la perforación obtenida a partir de la inyección de calor fuera menor que la obtenida durante la extracción de calor durante el invierno.

2.3.3.3.2 Modelos numéricos

Los modelos numéricos se pueden dividir en dos grupos: los basados en la aplicación sucesiva de modelos analíticos y los basados en simulación numérica.

Los modelos numéricos basados en modelos analíticos permiten mejorar la información que aporta la solución analítica aplicada de manera directa sobre los resultados. Dentro de este grupo, cabe destacar los trabajos realizados por Fujii *et al.* [58,81] y Bandos *et al.* [57].

Los primeros emplearon un cable-sensor de temperatura de fibra óptica que permitía medir el perfil de temperaturas del fluido portador de calor durante la realización del ensayo. Para ello, aplicaron la teoría CSM a rebanadas de secciones horizontales del terreno y plantearon un proceso iterativo basado en la temperatura de retorno del fluido, lo que permitió calcular la conductividad térmica del terreno a diferentes profundidades. Por otra parte, Bandos *et al.* [57] corrigieron la influencia de la temperatura ambiente en la temperatura registrada por el equipo mediante la aplicación de un proceso iterativo basado tanto en la teoría ILS como en la FLS, si bien el método era aplicable a cualquier teoría analítica disponible.

Las soluciones que aplican simulación numérica permiten incluir una mayor descripción del intercambiador en el modelo empleado. Así, los modelos se clasifican a su vez en 4 grandes grupos: los unidimensionales, los bidimensionales con simetría axial, los bidimensionales con simetría horizontal y los tridimensionales. Las aportaciones más importantes hasta la fecha se encuentran resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelos de simulación usados en la actualidad.

Autor	Modelo	Método	Parámetros estimados
Shonder y Beck [82]	1D	DF	$\lambda_{\text{relleno}}, \lambda_{\text{terreno}}$
Yavuzturk <i>et al.</i> [66,82]	2D	VF	$\lambda_{\text{relleno}}, \lambda_{\text{terreno}}$
Chiasson [80].	2D	DF	$R_b, \lambda_{\text{terreno}}$
Austin <i>et al.</i> [76]	2D	VF	$\lambda_{\text{relleno}}, \lambda_{\text{terreno}}$
Witte <i>et al.</i> [59]	2D	VF	$\lambda_{\text{relleno}}, \lambda_{\text{terreno}}$
Wagner y Clauser [83]	2D	EC	$C_{\text{terreno}}, \lambda_{\text{terreno}}$
Marcotte y Pasquier [84]	3D	EF	$R_b, \lambda_{\text{terreno}}$
Bozzoli <i>et al.</i> [85]	3D	EF	$C_{\text{terreno}}, \lambda_{\text{terreno}}, C_{\text{relleno}}, \lambda_{\text{relleno}}$

1D: Unidimensional; **2D:** Bidimensional; **3D:** Tridimensional
DF: Diferencia Finitas; **VF:** Volúmenes Finitos; **EC:** Elementos cilíndricos; **EF:** Elementos Finitos

Los modelos numéricos unidimensionales permiten modelar el terreno de manera similar a las teorías analíticas ILS y CSM explicadas, ya que las suposiciones realizadas para su aplicación son similares. A medida que fue avanzando la informática, surgieron nuevos modelos bidimensionales que permitían modelar una sección horizontal o vertical del sistema.

A diferencia de los unidimensionales, la mayoría de los modelos bidimensionales y tridimensionales están basados en el método de volúmenes finitos o de los elementos finitos debido a la compleja geometría del problema. Los modelos que analizan una sección horizontal del sistema suponen que la temperatura a lo largo de la perforación es constante y que el flujo de calor vertical es nulo. Por lo tanto, no permiten tener en cuenta ni la influencia de la temperatura ambiente, ni el gradiente térmico del terreno. Sin embargo, sí que permiten incluir el efecto de las corrientes subterráneas. Los modelos que analizan una rebanada vertical, en cambio, asumen que existe simetría axial lo que permite incluir temperaturas verticales variables en el terreno y el efecto de la temperatura ambiente, si bien los modelos existentes no han analizado esta posibilidad.

En el caso de emplear sondas coaxiales, permite incluso modelar el sistema geotérmico al completo, siempre y cuando no se tengan en cuenta las posibles corrientes subterráneas. Por último se encuentran los modelos tridimensionales cuyo desarrollo ha comenzado recientemente. Como menciona Al Khoury *et al.* [86], debido a la gran esbeltez que tienen los intercambiadores geotérmicos, la resolución de estos modelos requiere de una gran carga computacional que los hace poco prácticos en la actualidad.

La principal ventaja que presentan los modelos numéricos frente a los analíticos es que permiten tener en cuenta la influencia de las corrientes subterráneas en el comportamiento térmico a largo plazo de la instalación. Además, los modelos de simulación existentes permiten estimar más propiedades del terreno que los modelos analíticos a partir de los datos obtenidos por el ensayo. Con esa idea como punto de partida, durante el desarrollo de esta tesis se estudió la posibilidad de obtener los parámetros térmicos del terreno y de la perforación a partir de la simulación del TRT, para lo cual se planteó un modelo bidimensional basado en elementos finitos.

El modelo fue desarrollado a partir del software ANSYS. La figura 18 muestra la geometría en planta empleada, así como el mallado y elementos utilizado. Todos los elementos que definieron la sonda, el relleno y el terreno eran planos, del tipo PLANE55, mientras que para simular el flujo de agua por el interior de la sonda, se aproximó el agua como una masa puntual MASS71 centrada en el eje de cada tubería. La transferencia de calor por convección del agua a la pared interior del tubo se realizó a partir de elementos radiales de tipo convectivo LINK34.

La temperatura inicial de todo el modelo se estableció a partir de la temperatura media sin perturbar del terreno calculada previo a la realización del TRT. En cuanto a las condiciones de contorno, únicamente se estableció una condición de flujo de calor nulo en el perímetro exterior que delimita el terreno, comprobándose que al final del ensayo la temperatura del mismo era la misma a la inicial. Por último, el flujo de calor se aplicó equitativamente en los cuatro elementos MASS71 empleados,

Finalmente, este modelo se empleó únicamente para comprender la sensibilidad que presentaba la temperatura media del fluido, y por lo tanto la teoría ILS, a variaciones de las propiedades térmicas del terreno, relleno, sondas e incluso el caudal y las propiedades térmicas del fluido. A partir de este estudio se comprobó que el modelo numérico presentaba una gran influencia de las propiedades de los materiales, muchas de las cuales era necesario estimar. Cuanto más complejos eran los modelos planteados, mayor era la cantidad de propiedades que había que ajustar o estimar, mientras que la teoría ILS exige únicamente la estimación de la difusividad térmica del terreno.

Por todo ello, la utilización de modelos numéricos no aseguraba una mayor precisión de las propiedades térmicas del terreno y de la perforación respecto a las obtenidas por la ILS, razón por la cual se optó por emplear la teoría analítica en esta tesis. Sin embargo, se realizaron mejoras sobre el método para evitar las fluctuaciones de la temperatura registrada debido a la temperatura ambiente.

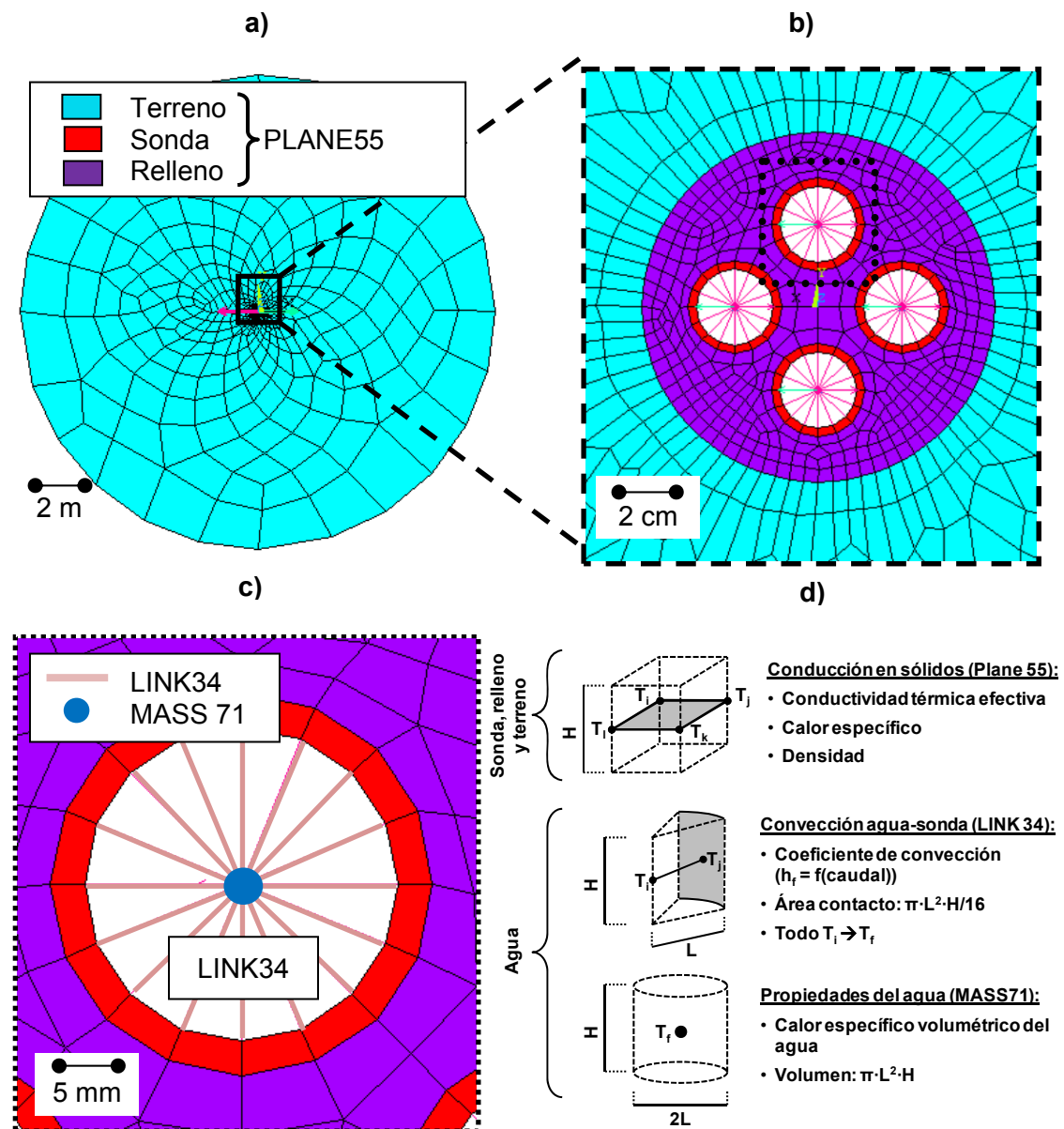


Fig. 18. Modelo empleado para el análisis de la sensibilidad del método ILS: a) geometría y mallado del terreno en planta, b) detalle de la geometría y mallado empleado en el relleno, tuberías y fluido intercambiador de calor, c) detalle del modelo empleado en el fluido y d) descripción de los elementos empleados en cada caso.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO COMO MORTERO GEOTÉRMICO

3.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Cada mortero propuesto en esta investigación está compuesto por la mezcla de un único árido, cemento, agua y aditivos.

El empleo de un único árido se planteó con el objetivo de determinar sin interferencias la influencia de cada uno de los áridos en las propiedades finales del mortero resultante. En caso de ser necesario, se empleó filler calizo como complemento corrector de las posibles deficiencias que presentara el árido, pero no se mezclaron los distintos áridos propuestos como principales en esta tesis.

Para reducir la cantidad de agua requerida por la mezcla, aumentar su trabajabilidad y reducir su segregación y exudación, se empleó un aditivo superplastificante. Para su dosificación, predominó la reducción de agua obtenida frente al coste económico del mismo, dado el reducido impacto económico del coste del material de relleno respecto al de toda la instalación geotérmica.

La autocompactabilidad del mortero se estableció a partir de un rango de consistencias determinado a partir del propio ensayo de consistencia por la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3) y del ensayo de determinación de su densidad en fresco (UNE-EN 1015-6). De esta manera, se determinó un diámetro mínimo de 260 mm en base al valor mínimo de consistencia que permitió el llenado por vertido directo del mortero de los moldes de densidad en fresco sin requerir compactación alguna. Por otra parte, para limitar la segregación experimentada por la mezcla y asegurar una consistencia similar en todos los morteros realizados, se estableció un diámetro máximo de 300 mm.

En esta tesis se descartó la realización del ensayo de flujo en cono (ASTM C939-02 [87]) o el método del cono (UNE 445-2009 [88]) debido a su estrecho orificio en comparación al del tubo de inyección empleado y a que, en base al tamaño máximo de árido propuesto y al criterio de autocompactabilidad empleado, no se previeron problemas de flujo del mortero a lo largo del mismo.

Por último, la cantidad de agua requerida para cada dosificación se determinó en base al rango de consistencias establecido.

3.2 MATERIALES EMPLEADOS

3.2.1 CEMENTO

Se utilizó un cemento tipo CEM II/B-M (V) 32,5 R de la compañía *Cementos Tudela Veguín S.A.* Se trata de un cemento mixto, de alta resistencia inicial y con un alto contenido en cenizas volantes silíceas, adición habitualmente empleada en la confección de hormigones autocompactantes debido a la sinergia que presenta su uso con filler calizo [89-91].

Dentro de las aplicaciones que el fabricante considera como idóneas se encuentra la del uso para cimentaciones, con lo que se consideró este cemento como apto para esta investigación. En la Tabla 3 se pueden observar las características del cemento escogido.

Tabla 3. Características generales del cemento proporcionadas por la empresa.

	Especificaciones RC-07	Valores habituales Aboño
Composición Referida al núcleo de cemento*		
Clinker	65-79 %	72 %
Adición	21-35 %	28 %
Componentes minoritarios	0-5 %	0 %
Prescripciones físicas		
Inicio de fraguado	≥ 60 minutos	250 minutos
Final de fraguado	< 720 minutos	300 minutos
Expansión	≤ 10 mm	0,3 mm
Prescripciones mecánicas		
1 Día		15 MPa
2 Días	≥ 13,5 MPa	24 MPa
7 Días		35 MPa
28 Días	32,5 ≤ X ≤ 52,5 MPa	47 MPa
Prescripciones químicas		
Trióxido de azufre	≤ 3,5 %	2,5 %
Cloruros	≤ 0,1 %	0,01 %
Adición: Ceniza volante		
* No incluido el regulador de fraguado		

3.2.2 ÁRIDOS

Esta tesis estudia el uso de diferentes áridos como material principal constituyente de morteros autocompactantes así como la aplicabilidad de los mismos como relleno de perforaciones geotérmicas. Para ello, se seleccionaron los siguientes áridos:

- **Arena caliza:** árido natural abundante en todo el territorio español, ampliamente empleado en la confección de hormigones.
- **Arena silícea:** árido natural abundante en todo el territorio español, ampliamente empleado como arena en hormigones y como árido principal en rellenos de perforaciones geotérmicas debido a sus altas prestaciones térmicas.

- **Escoria de acería de horno de arco eléctrico (EAE):** subproducto obtenido durante la obtención de acero a partir de chatarra de hierro dulce o acero, principalmente.
- **Residuos de construcción y demolición (RCD):** subproducto procedente de residuos de construcción y demolición (árido reciclado).

Con el objetivo de caracterizar los áridos empleados, se siguieron las recomendaciones de la norma UNE-EN 13139:2003. Además se comprobaron las características requeridas por la *Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08* para áridos empleados en hormigones en masa no-estructurales.

Los requisitos granulométricos de la arena para su uso en morteros no estaban claramente definidos. De hecho, no se encontró ningún huso granulométrico definido en la normativa consultada, lo cual permitió una gran libertad a la hora de la elección del árido [92]. Basados en el trabajo realizado por Allan *et al.* [45] y en el tamaño máximo de árido recomendado para morteros autonivelantes en la bibliografía consultada [92], se decidió emplear los áridos con un tamaño máximo de árido de 2 mm, para lo cual fue necesario un tamizado previo del material recibido en laboratorio.

Para la EAE y el RCD se empleó **filler calizo** como corrector granulométrico. Dado que tanto la arena caliza como la silíceas escogidos eran áridos comerciales que contaban con los certificados europeos correspondientes que garantizaban el cumplimiento de las normas UNE-EN 13139:2003 y UNE-EN 12620:2003+A1:2009, se decidió usar la granulometría de ambos como referencia.

3.2.2.1 Arena caliza

La arena caliza empleada se obtuvo de la cantera de *Peñas Negras*, en Escobedo, Cantabria, perteneciente a *Hormigones Santander S.L.* La Fig. 19 muestra la arena tal y como fue recibida en laboratorio y una vez tamizada al tamaño de 0/2 mm establecido.

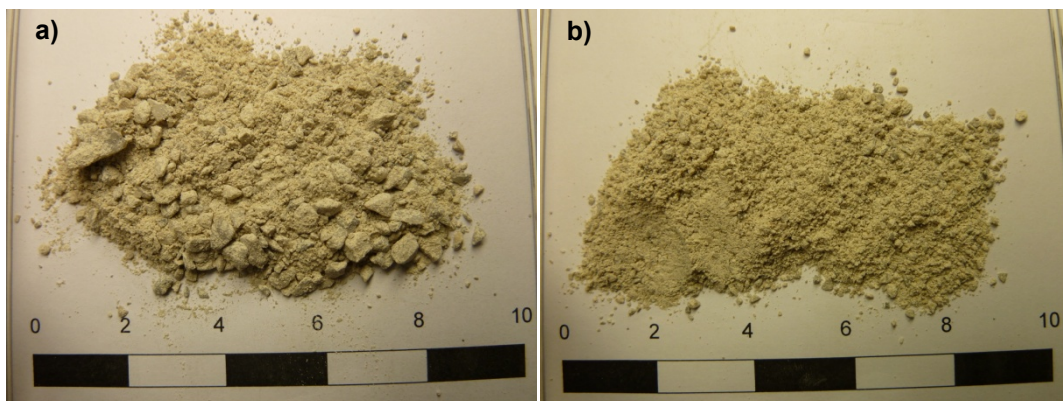


Fig. 19. Arena caliza empleada a) granulometría de 0/5 mm original y b) granulometría de 0/2 mm final (escala en cm).

En primer lugar se determinó la granulometría según la norma UNE-EN 933-1:1998/A1:2006. La Tabla 4 muestra la granulometría del material finalmente utilizado.

Tabla 4. Granulometría de la arena caliza 0/2 mm resultante.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0,0	100,0
2	7	0,7	99,3
1	386	38,6	61,4
0,5	597	59,7	40,3
0,25	721	72,1	27,9
0,125	793	79,3	20,7
0,063	841	84,0	16,0

La granulometría resultante se encontraba dentro del rango permitido por la norma UNE-EN 13139:2003 en lo que se refiere a su contenido de finos (menor al 30%). La calidad de los finos se consideró suficiente por contar con un equivalente de arena del 60%, medido según la norma UNE-EN 933-8:2012.

Para terminar con la caracterización del árido, se determinó la densidad aparente de sus partículas y su absorción de agua de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. El árido presentó una densidad aparente de $2,71 \text{ g/cm}^3$ y una absorción del 0,5%. Tanto la norma UNE-EN 12620:2003+A1:2009 como la *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08* limitaban la absorción del árido al 5%, valor muy superior al experimentado en la arena caliza.

3.2.2.2 Arena silícea

La arena silícea empleada se obtuvo de la cantera de *El Fontanón*, en Gijón, Asturias. En primer lugar, se tamizó todo el material por un tamiz de 2 mm de apertura, resultando en la granulometría de la Tabla 5. La Fig. 20 muestra el árido original de granulometría 0/4mm recibido en laboratorio y el árido una vez tamizado.

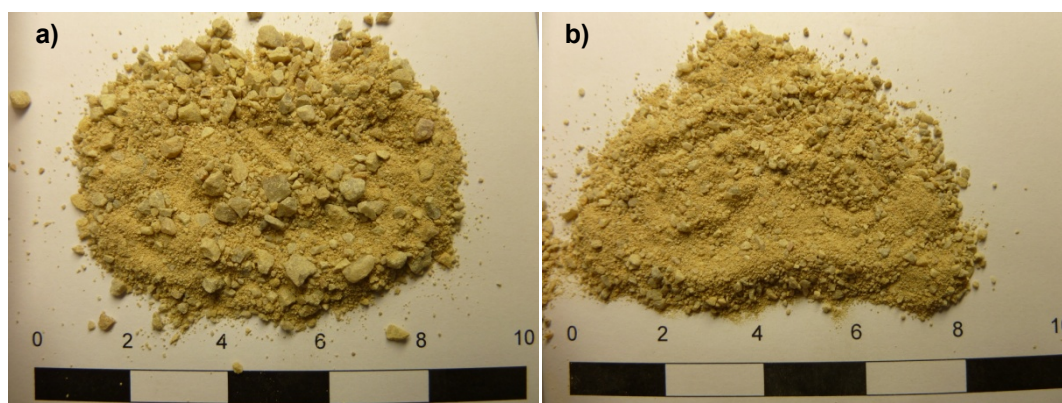


Fig. 20. Arena silícea empleada en laboratorio a) granulometría 0/4 mm original y b) granulometría 0/2 mm final (escala en cm).

Tabla 5. Granulometría de la arena sílicea 0/2 mm resultante.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0,0	100,0
2	0	0,0	100,0
1	169	21,4	78,6
0,5	272	34,4	65,6
0,25	421	53,1	46,9
0,125	577	72,8	27,2
0,063	654	82,5	17,5

La granulometría resultante se encontraba dentro del rango permitido por la norma UNE-EN 13139:2003 en lo que se refiere a su contenido de finos (menor al 30%). La calidad de los finos era baja, presentando un valor del equivalente de arena del 26%, medido según la norma UNE-EN 933-8:2012. A pesar de ello, se optó por emplear la arena sin realizarle ningún lavado, ya que la resistencia requerida por el mortero resultante no era elevada al no tener fines estructurales.

La arena sílicea presentó una densidad aparente de sus partículas y una absorción de agua de 2,65 g/cm³ y 0,16% respectivamente, medidas de acuerdo a lo estipulado por la norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. Estos valores eran, en ambos casos, menores a los observados en la arena caliza. En cuanto a la absorción, la norma UNE-EN 12620:2003+A1:2009 y la *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08* limitaban su valor al 5%, límite muy superior al obtenido en este caso.

3.2.2.3 Filler calizo

El filler calizo no se empleó como adición al cemento, sino que actuó como modificador de la granulometría de la EAE y el RCD. Al igual que la arena caliza, el árido fue proporcionado por la cantera de *Peñas Negras*, en Escobedo, Cantabria (Fig. 21).



Fig. 21. Filler calizo empleado en laboratorio (escala en cm).

En la Tabla 6 se muestra la granulometría obtenida en laboratorio en base a la norma UNE-EN 933-1:1998/A1:2006. Los resultados obtenidos indicaron que cumplía con los requisitos granulométricos establecidos por las normas UNE-EN 13139:2003 y UNE-EN 12620:2003+A1:2009.

Como el filler tenía la misma procedencia que el árido calizo, no se realizaron ensayos específicos para determinar su calidad. Por último, se determinó una densidad aparente de las partículas del filler de 2,75 g/cm³ según la norma UNE 103-302-94.

Tabla 6. Granulometría del filler calizo

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0	100
2	0	0	100
1	1,2	0,1	99,9
0,5	4,9	0,4	99,6
0,25	31,2	2,7	97,3
0,125	129,2	11,4	88,6
0,063	289,6	25,5	74,5

3.2.2.4 Escoria de Acería de horno de arco Eléctrico

La Escoria de Acería de horno de arco Eléctrico (EAE) es un subproducto obtenido durante el proceso de obtención de acero a partir de chatarra de hierro dulce o acero, principalmente. En esta tesis, se empleó EAE procedente de la fábrica *Global Steel Wire (GSW)*, situada en Santander.

Para evitar efectos indeseados sobre el medio ambiente, la normativa exigía la realización del ensayo de lixiviados que fue realizado por una empresa externa en el año 2008. El test de lixiviación se realizó en base a las normas UNE-EN 12457-4:2003 y UNE-EN 12506:2004 sobre los áridos una vez finalizado su envejecimiento.

La legislación que regulaba de manera específica las sustancias potencialmente contaminantes a analizar en escorias así como los valores máximos de lixiviación permitidos variaban en función de la comunidad autónoma, destacando las siguientes normas:

- Orden del 15 de febrero de 1996 publicada en el diario oficial de la Generalitat de Cataluña número 2182-13.3.1996 (Cat).
- Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco (PV).

- Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria (Can).

La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos en el ensayo así como los valores máximos permitidos por la legislación consultada para su posible uso directo como bases, subbases o explanadas mejoradas de carreteras. El decreto 34/2003 por el cual se regulaba el uso de escorias de horno de arco eléctrico en el País Vasco era el único de la normativa consultada que establece unos valores límite diferentes para el arsénico y el selenio en función de si el árido se iba a emplear directamente (como era el caso de su uso en bases, subbases o explanadas mejoradas) o como capa de rodadura de carreteras. Al igual que en el caso de la capa de rodadura con el betún, en el caso del mortero el árido quedaría recubierto por la pasta de cemento por lo que su exposición a la lixiviación se vería reducida significativamente, como ya fue comprobado con anterioridad en hormigones realizados con este mismo árido por Manso *et al.* [93,94].

Dado que en este caso se contaba solamente con el ensayo realizado sobre el árido suelto, para la comprobación de la validez del árido se emplearon los límites establecidos para el mismo. Como se puede observar, la escoria cumplió en todos los casos con la legislación actual, por lo que se consideró válida para su uso en esta tesis.

Tabla 7. Resultados del test de lixiviación realizado sobre la EAE empleada.

Parámetro	Método	Unidad	Resultado	Valor límite establecido		
Test de lixiviación	EN 12457-4	-	10 l/kg	Cat	PV	Can
Arsénico	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	<0,1	0,5		0,5
Bario	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	7	20	17	20
Cadmio	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	<0,03	0,04	0,009 (0,6*)	0,04
Cromo total	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	0,1	0,5	2,6	0,5
Níquel	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	<0,1	0,5	0,8	0,4
Plomo	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	0,2	0,5	0,8	0,5
Zinc	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	0,1	4	1,2	4
Mercurio	A.atómica (generador de hidruros)	mg/Kg*	<0,003	0,01	ND	0,01
Cobre	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	<0,1	2	ND	2
Cloruros	SM4500-Cl-B	mg/Kg*	29	800	ND	ND
Sulfatos	SM 4500-SO42-C	mg/Kg*	49	1000	ND	ND
COD	Espectrofotometría UV-VIS	mg/Kg*	18	ND	ND	ND
Fluoruros	Espectrofotometría UV-VIS	mg/Kg*	11	18	ND	ND
Índice de fenol	Espectrofotometría UV-VIS	mg/Kg*	0,1	ND	ND	ND
Selenio	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	0,06	0,1	0,007(0,2*)	ND
Antimonio	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	<0,02	0,06	ND	ND
Molibdeno	A.atómica (C. grafito)	mg/Kg*	0,4	0,5	1,3	ND

Cat: Cataluña; PV: País Vasco; Can: Cantabria; ND: No definido

* Peso respecto al árido en seco

Según los trabajos llevados a cabo por numerosos autores [93-97], la EAE es válida para la confección incluso de hormigones de alta resistencia, presentando características resistentes similares o superiores al hormigón convencional. A su vez, determinaron que la durabilidad del hormigón frente a ciclos de hielo-deshielo era similar al de un hormigón convencional, si bien siempre inferior al mismo debido al potencial expansivo de este árido. Para obtener esos resultados, diversos autores

[93,94,96-98] establecieron que la escoria debe machacarse, homogeneizarse, degradarse y envejecerse para evitar expansiones térmicas una vez conforme la matriz del hormigón. La escoria empleada en este caso fue el resultado de este proceso. Por otra parte, Manso *et al.* [94] determinó que la reactividad álcali-árido del hormigón de EAE se encontraba por debajo de los límites establecidos por la norma ASTM C-227.

El árido se recibió en laboratorio con una granulometría 0/6mm (Fig. 22a) por lo que se tamizó todo el material (Fig. 22b), lo que resultó finalmente en la granulometría de la Tabla 8.

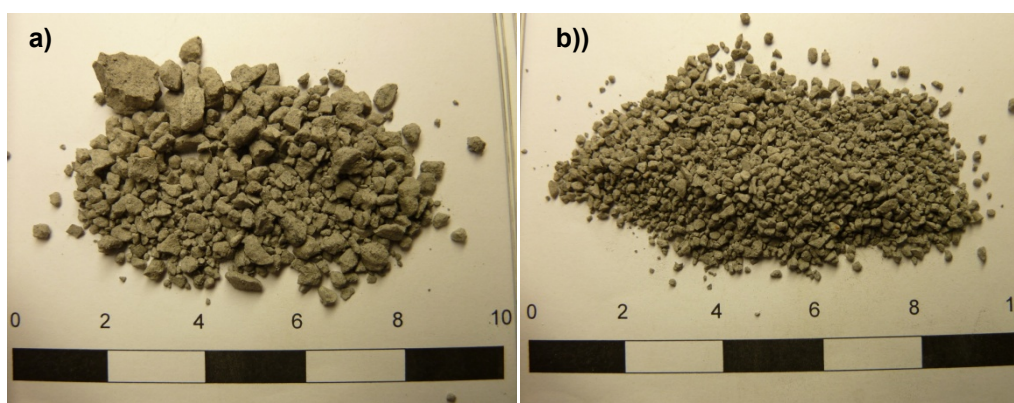


Fig. 22. Arena de EAE empleada en laboratorio a) granulometría 0/6 mm original y b) granulometría 0/2 mm final (escala en cm).

Tabla 8. Granulometría de la EAE una vez tamizada.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0,0	100,0
2	2	0,2	99,8
1	685	60,6	39,4
0,5	1002	88,6	11,4
0,25	1073	94,9	5,1
0,125	1096	97,0	3,0
0,063	1109	98,1	1,9

La granulometría resultante se encontraba dentro del rango permitido por la norma UNE-EN 13139:2003 en lo que se refiere a su contenido de finos (menor al 30%). La calidad de los finos fue alta, presentando un valor del equivalente de arena del 83% medido según la norma UNE-EN 933-8:2012. Sin embargo, presentó un gran déficit de finos, por lo que resultó necesaria la aportación de filler calizo para conseguir una granulometría similar a la de la arena caliza.

La escoria presentó una densidad aparente de sus partículas y una absorción de agua de 3,820 g/cm³ y 1,83%, respectivamente, medidas de acuerdo a lo estipulado por la

norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. Estos valores fueron, en ambos casos, mayores a los observados en la arena caliza, 2,71 kg/m³ y 0,5%, respectivamente. En cuanto a la absorción, se confirmó que cumplía con el límite del 5% establecido por la norma UNE-EN 12620:2003+A1:2006 y la instrucción EHE-08.

Dada la gran diferencia de densidades observada entre el filler calizo y el árido EAE, se realizó el cálculo de la granulometría en volumen para distintas proporciones de mezcla. Una sustitución en peso del 25% de EAE por filler calizo presentó una distribución granulométrica similar a la de la arena caliza (Tabla 9 y Fig. 23).

Tabla 9. Granulometría por volúmenes (en cm³) de la EAE y el filler calizo (F) en conjunto.

Tamiz	Peso EAE	Peso F	Volumen EAE	Volumen F	Conjunto
mm	g/tamiz	g/tamiz	cm ³ /tamiz	cm ³ /tamiz	%pasa
4	0,0	0	0	0	100,0
2	2	0	0	0	99,9
1	453	0	119	0	57,4
0,5	210	1	55	0	37,6
0,250	47	6	12	2	32,5
0,125	15	22	4	7	28,5
0,063	9	35	2	12	23,5

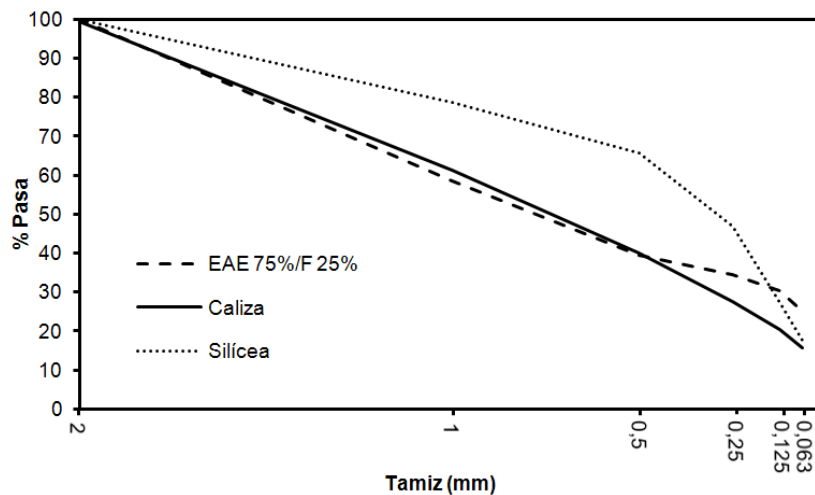


Fig. 23. Comparación de la granulometría obtenida en la EAE con las de referencia.

3.2.2.5 Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

La arena reciclada empleada fue proporcionada por la empresa *Tecnología y Reciclados S.L.*. Se trata de la arena descartada durante el proceso de obtención de árido reciclado a partir de hormigón procedente de demoliciones. En primer lugar, se realiza una primera limpieza de los residuos de construcción y demolición recibidos. A continuación, se procede a realizar un primer machacado del hormigón, tras el cual se

criba eliminando las partículas que sean menores a 6 mm. El proceso de obtención del árido reciclado continúa, realizándose un segundo machaqueo que se prolonga hasta conseguir la grava reciclada con la granulometría deseada.

Como la *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08* prohíbe el uso de árido reciclado para tamaños inferiores a 4 mm, las partículas de granulometría 0/6 mm resultado de ese primer machaqueo se descartaban en la actualidad. Sin embargo, en esta tesis se trató de evaluar su posible uso para morteros de relleno, ya que éstos no tenían fines estructurales.

Las especificaciones de la arena de granulometría 0/6 mm aportadas por la cantera se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Especificaciones de la arena reciclada.

Ensayo	Norma	Resultado
Azul de metileno	UNE-EN 933-9:1999	5,66
Sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1:2010	0,56
Contenido total en azufre	UNE-EN 1744-1:2010	0,11
Compuestos orgánicos	UNE-EN 1744-1:2010	Negativo
Equivalente de arena	UNE-EN 933-8:2012	36

Todos los valores registrados cumplieron lo establecido en la norma UNE-EN 13139:2003, por lo que se decidió proseguir con un análisis convencional del árido. La Fig. 24 muestra el árido original de granulometría 0/6mm recibido en laboratorio (a) y el árido una vez tamizado (b). La Tabla 11 muestra la granulometría del árido una vez tamizado en 2 mm.

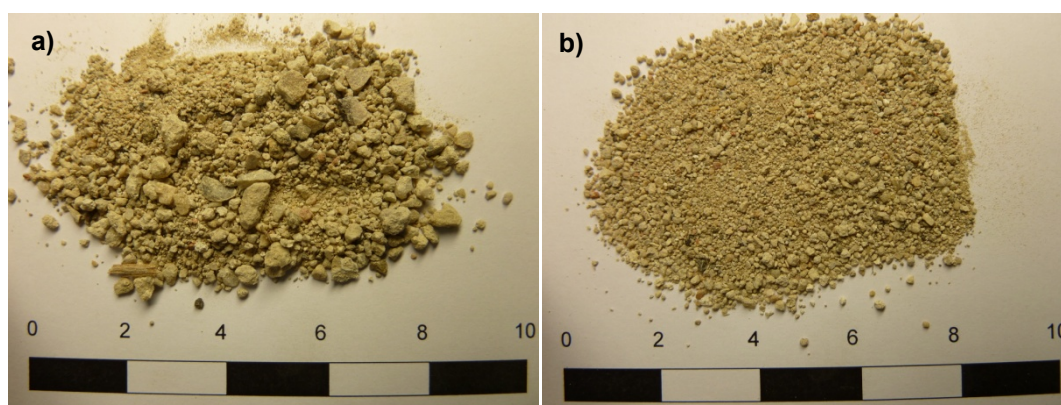


Fig. 24. Arena de RCD empleada en laboratorio a) granulometría 0/6 mm original y b) granulometría 0/2 mm final (escala en cm).

La granulometría resultante cumplió con el límite de finos permitido por la norma UNE-EN 13139:2003. Por otra parte, dado que la *EHE-08* no permitía el uso de áridos reciclados de tamaño inferior a 4 mm, era de esperar que la calidad de finos del RCD

fuera baja, presentando un valor del equivalente de arena del 43% medido en laboratorio según la norma UNE-EN 933-8:2012.

Tabla 11. Granulometría de la arena reciclada.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0,0	100,0
2	0	0,0	100,0
1	267	26,6	73,4
0,5	526	52,4	47,6
0,25	711	70,8	29,2
0,125	817	81,4	18,6
0,063	882	87,9	12,1

La arena de RCD presentó una densidad aparente de sus partículas y una absorción de agua de 2,57 g/cm³ y 5,07%, respectivamente, medidas de acuerdo a lo estipulado por la norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. La absorción superó marginalmente el 5% establecido en la EHE-08 y en la norma UNE-EN 12620:2003+A1:2006. En este caso se decidió proseguir con el árido ya que el mortero resultante no tenía fines estructurales.

Pese a la gran absorción de agua y la mala calidad de los finos del árido, se decidió emplear el árido sin eliminar estos, ya que en esta tesis se pretendía emplear la mayor proporción de árido reciclado que fuera posible y además la resistencia requerida por el mortero resultante no era elevada. No obstante, para mejorar la calidad de finos del árido, se añadió un 10% de filler en peso.

La Tabla 12 muestra la granulometría en volumen resultante, y la Fig. 25 muestra la granulometría del árido resultante frente a las de la arena caliza y silícea tomadas como referencia. En este caso, la granulometría resultante se situó entre la observada para los dos áridos tomados como referencia.

Tabla 12. Granulometría por volúmenes del RCD y el filler calizo (F) en conjunto.

Tamiz mm	Peso RCD g/tamiz	Peso F g/tamiz	Volumen RCD cm ³ /tamiz	Volumen F cm ³ /tamiz	Conjunto %pasa
4	0	0	0	0	100,0
2	0	0	0	0	100,0
1	240	0	93	0	75,7
0,5	232	0	90	0	52,1
0,250	166	2	65	1	35,1
0,125	95	9	37	3	24,7
0,063	58	14	23	5	17,6

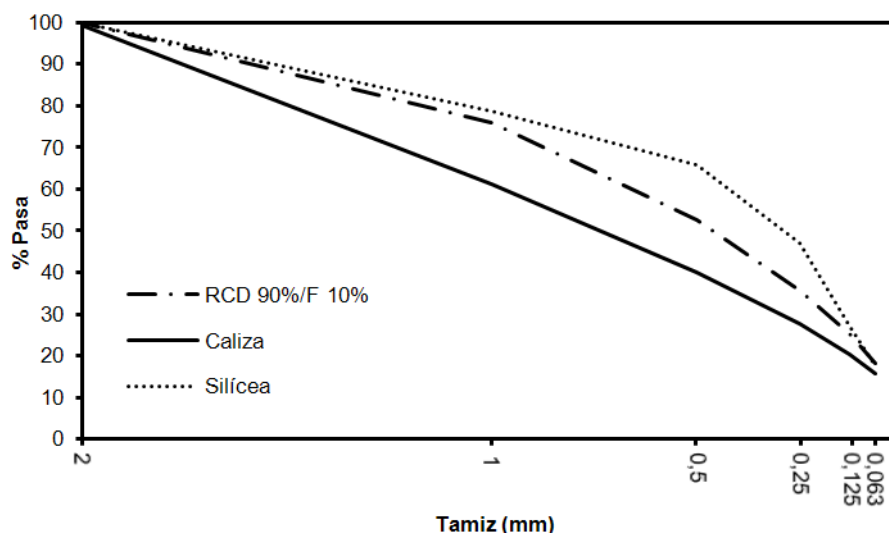


Fig. 25. Granulometría obtenida en el RCD frente a las de referencia.

3.2.3 ADITIVOS

Se utilizó el superplastificante (SP) *MELMENT F10* de la empresa *BASF*. Se trata de un aditivo comercial que se suministra en polvo y está especialmente diseñado para la preparación de morteros autonivelantes. El SP aporta un elevado poder plastificante al mortero, evita la exudación del agua contenida por el mismo, aumenta la trabajabilidad de la mezcla y facilita su bombeo; todo ello mediante la reducción del agua de amasado necesaria del mortero.

La mezcla con el cemento se debe realizar en seco, siendo la dosificación recomendada por el fabricante del 0,5-2% respecto al peso del cemento. En la se muestran las propiedades del aditivo.

Tabla 13. Propiedades del superplastificante.

Apariencia física	Polvo blanco
Perdida por secado máxima (%)	4%
Densidad aparente	500-800 kg/m ³
PH (20°C, solución al 20%)	9-11,4
Dosificación recomendada	0,2-2%

3.3 ENSAYOS

3.3.1 ENSAYO DE LA MESA DE SACUDIDAS

El ensayo de la mesa de sacudidas se realizó según la norma UNE-EN 1015-3:2000/A2:2007. La Fig. 26 muestra los pasos del ensayo. En primer lugar, se colocó el molde tronco-cónico de latón centrado en la superficie limpia y seca de la mesa de sacudidas (a). A continuación, se rellenó el molde vertiendo directamente sobre él y se enrasó (b), tras lo cual se levantó el molde y se esperó a que el mortero fluyera y se detuviera. Una vez detenido, se aplicaron 15 sacudidas al mortero. Cada sacudida supuso la caída del tablero de la mesa desde una altura de 1 cm. Por último, se midieron dos diámetros de la mancha de mortero resultante que fueran perpendiculares entre sí (c). El resultado final se calculó a partir de la media de los dos diámetros obtenidos.

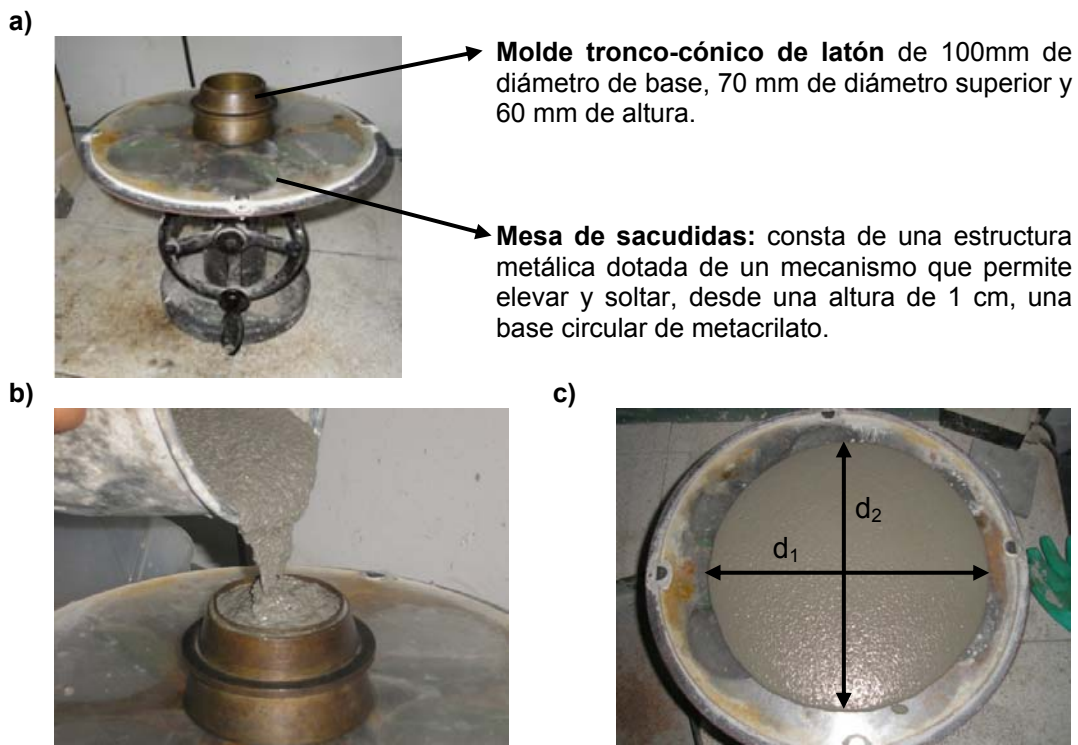


Fig. 26. Realización del ensayo de sacudidas: a) equipo empleado, b) llenado del molde y c) situación del mortero una vez terminado el ensayo.

3.3.2 DENSIDAD APARENTE EN FRESCO

La densidad aparente en fresco se determinó en base a la norma UNE-EN 1015-6:1999. La norma establece un recipiente de acero inoxidable de 1 l de capacidad para su correcta ejecución. En este caso, se sustituyó ese recipiente por dos recipientes de cristal de características similares (Tabla 14), dado que este recipiente permitía la inspección visual de posibles oquedades, pudiendo así controlar la autocompacta-

bilidad de la mezcla. El volumen se calculó a partir del llenado de los botes con agua destilada a 20°C ($m_{w+recipiente}$) mediante la ecuación (8):

$$V_{recipiente} = \frac{m_{w+recipiente} - m_{recipiente}}{\rho_w} \quad (8)$$

Tabla 14. Características del recipiente empleado.

Recipiente	$m_{recipiente}$ (g)	Volumen (l)
1	313,3	0,712
2	308,6	0,721

En primer lugar, se pesaron los recipientes vacíos ($m_{recipiente}$) y se rellenaron los moldes. La norma especificaba distintos procedimientos de llenado del recipiente en función de la consistencia del propio mortero. Dado que los morteros debían ser autocompactantes y el rango establecido era mayor a los 200 mm establecidos por norma, se rellenaron los moldes vertiendo directamente el mortero en su interior, hasta que sobrenadara. A continuación, se enrasó la superficie del molde, y se anotó el peso del molde lleno (m_{Total}). La densidad aparente en fresco (ρ_f) de cada muestra se calculó mediante la ecuación (9), y la densidad aparente en fresco resultante para cada mortero evaluado se calculó a partir de la media de los dos valores observados.

$$\rho_f = \frac{(m_{total} - m_{recipiente})}{V_{recipiente}} \quad (9)$$

3.3.3 DENSIDAD APARENTE EN ENDURECIDO Y POROSIDAD ACCESIBLE

Este ensayo permite el cálculo de la densidad y de la porosidad accesible al agua del mortero una vez endurecido. La norma UNE-EN 1015-10:1999/A1:2006 establece el siguiente procedimiento para el cálculo de la densidad aparente:

- Secado a masa constante: se secan las probetas en estufa a 105 ± 5 °C hasta que el cambio de masa de dos pesadas sucesivas separadas 2h no sea mayor al 0,2%, determinando la masa en seco (m_{seca}).
- Se sumergen las probetas en agua a 20 ± 2 °C hasta que el cambio de masa entre dos pesadas sucesivas separadas 15 min no sea mayor al 0,2% de la masa de la probeta seca determinando la masa saturada (m_{sat}).

La norma actual establece que el volumen de cada una de las probetas empleadas se calcule a partir de las dimensiones del molde empleado. La Fig. 27 muestra tanto el molde empleado como una de las tres probetas de mortero resultantes. Como la probeta tiene unas dimensiones de $4 \times 4 \times 16$ cm³, el volumen total de cada probeta (V_s) es de $2,56 \cdot 10^{-4}$ m³. Sin embargo, debido a la menor exactitud de las dimensiones de los moldes por la pérdida parcial del agua de amasado durante el fraguado y

endurecimiento del mortero, en este caso se decidió calcular el volumen de cada probeta en base a la fórmula proporcionada en la versión anterior (UNE-EN 1015-10:1999), ya que este método había sido empleado con anterioridad para la determinación de la porosidad por otros autores en morteros [99].

Por otra parte, debido a la poca profundidad del nivel freático en España, era de esperar que el curado del relleno en una instalación geotérmica real se produjera sumergido en agua subterránea, por lo que el curado de las probetas se realizó sumergido en agua.

Por lo tanto, finalmente el ensayo se realizó de acuerdo al procedimiento que se explica a continuación:

- Se pesaron las probetas nada más sacarlas del agua determinando la masa saturada (m_{sat}).
- Se pesaron las probetas sumergidas en agua destilada obteniendo la masa sumergida (m_i).
- Se secaron las probetas en el horno durante 24h a 105 °C y se pesaron una vez enfriadas para determinar su masa seca (m_{seca}).

En resumen, el volumen de la probeta (V_s), la densidad aparente en endurecido del material (ρ_h), la densidad aparente en endurecido saturada de agua ($\rho_{h,sat}$) y la porosidad accesible del agua en volumen (ϕ) se calcularon a partir de las ecuaciones (10), (11), (12) y (13), respectivamente, donde ρ_w es la densidad del agua destilada a 20°C cuyo valor es 998,3 kg/m³.

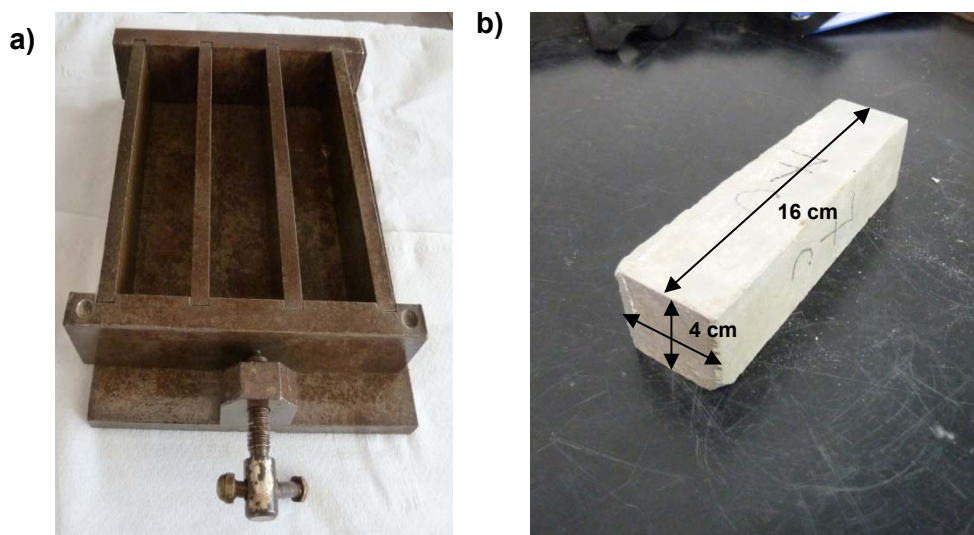


Fig. 27. Ensayo de densidad aparente en endurecido: a) molde empleado para la fabricación de probetas y b) probetas ensayadas.

$$V_s = \frac{m_{sat} - m_i}{\rho_w} \quad (10)$$

$$\rho_h = \frac{m_{seca}}{V_s} \quad (11)$$

$$\rho_{h,sat} = \frac{m_{sat}}{V_s} \quad (12)$$

$$\phi = \frac{V_w}{V_s} = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (13)$$

3.3.4 RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN SIMPLE

Los valores de resistencia a flexión y a compresión simple permiten determinar las propiedades mecánicas resistentes del mortero. La resistencia a flexión del material de relleno evita la aparición de grietas en el mismo debido a la presión del tubo de polietileno embebido durante el funcionamiento de la instalación en modo refrigeración. La resistencia a compresión, en cambio, solamente es determinante en aquellos casos en los que la perforación se encuentre debajo del edificio, en cuyo caso resiste parte de las solicitaciones de éste como parte del terreno. Los ensayos se realizaron en base a la norma UNE 1015-11:2000/A1:2007.

Las probetas necesarias en este ensayo fueron similares a las empleadas para determinar la densidad aparente en endurecido del mortero. Previo a la realización del ensayo, las probetas se secaron en estufa durante 24h a 105°C, y se dejaron enfriar durante 24h para que estuvieran a temperatura ambiente en el momento del ensayo. A continuación se ensayaron las probetas a flexión (Fig. 28a), tras lo cual las mitades resultantes del ensayo a flexión se rompieron a compresión simple (Fig. 28b). Por último, las resistencias a flexión y a compresión simple se calcularon a partir de las ecuaciones (14) y (15), calculándose el valor final a partir de la media de las probetas ensayadas en cada caso.

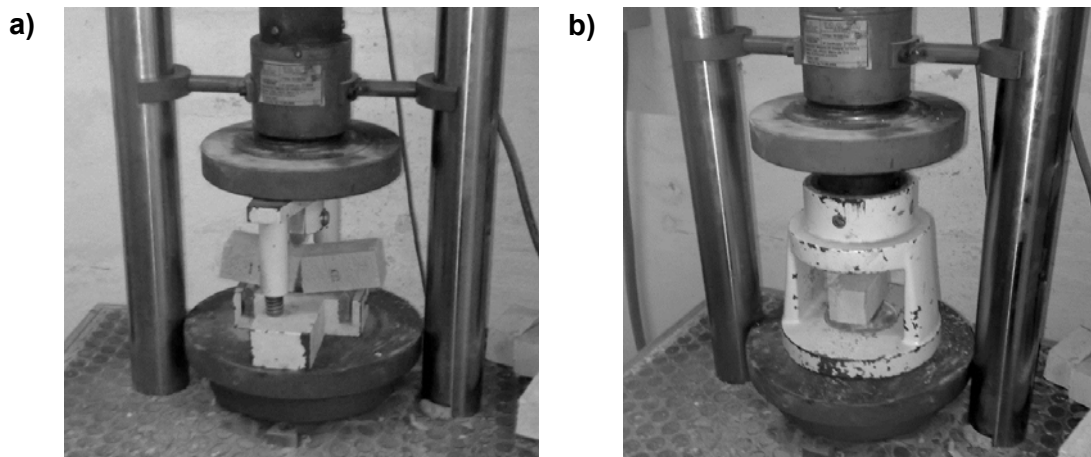


Fig. 28. a) Ensayo de flexión y b) ensayo a compresión simple

$$\sigma_f = 1.5 \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (14)$$

$$\sigma_c = \frac{F}{b \cdot d} \quad (15)$$

Donde,

- σ_f es la resistencia a flexión de la probeta (N/mm²)
- σ_c es la resistencia a compresión de la probeta (N/mm²)
- F es la fuerza aplicada por el equipo en el momento de rotura (N)
- L es la distancia entre los apoyos del dispositivo empleado para la rotura a flexión (100 mm)
- b es el ancho de la probeta, determinado por las dimensiones del molde (40 mm)
- d es la altura de la probeta, determinado por las dimensiones del molde (40 mm)

3.3.5 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA APARENTE

La conductividad térmica aparente es la propiedad del relleno que más influye en la eficiencia final del intercambiador geotérmico. Aunque existen numerosas normas para determinar la conductividad térmica de otros materiales, no hay ninguna específica para el hormigón o el mortero.

A lo largo de este proyecto se emplearon dos metodologías de ensayo diferentes en función del equipo empleado: el equipo *Mathis TCi* de *C-Therm* y el *TPSYS02* de *Hukseflux*. A continuación se explican cada uno de los ensayos según la máquina empleada.

3.3.5.1 Ensayo de conductividad con el equipo *Mathis TCi* de *C-Therm*

El equipo *Mathis TCi* de *C-Therm* permite calcular la conductividad térmica de cualquier material, ya sea sólido, líquido o en polvo. La disponibilidad de este equipo para la realización de los ensayos fue posible gracias a la financiación de la Fundación para la Investigación Ciencia y Tecnología del Principado de Asturias (FICYT) referencia FC-10-EQUIP10-17 cofinanciado con fondos FEDER.

La realización del ensayo se basa en el método de la *Fuente Plana Transitoria* (*Transient Plane Source* en inglés). El ensayo se realiza según lo establecido en la norma ISO/DIS 22007-2.2. En la bibliografía se encontraron diversos trabajos que permitieron comprobar la validez de este método para la medición de la conductividad térmica de sólidos. Gustafsson [100] fue uno de los pioneros en emplear el método para evaluar las propiedades térmicas de materiales sólidos homogéneos. Además, el

método permitió obtener resultados satisfactorios en la medición de las propiedades térmicas de materiales de construcción altamente porosos [101], materiales aislantes [102] y pastas de cemento [52]. Este mismo equipo ya fue empleado por Mikulic *et al.* [103] y Cha *et al.* [104] para determinar la evolución de las propiedades térmicas de la lechada de cemento durante su fraguado y endurecimiento.

Este equipo realiza el ensayo de conductividad térmica basándose en la medida de la efusividad térmica del material; es decir, en su capacidad de absorción de calor al ser sometido a una variación en una de sus condiciones de contorno, en este caso una superficie. Para ello, aplica un flujo de calor constante durante 10 s en la superficie de contacto entre el aparato y la probeta, midiendo el aumento de temperatura registrado en el propio aparato de ensayo. De esta manera, calcula tanto la efusividad como la conductividad térmica del material de manera directa. La ecuación a partir de la que se realizan los cálculos es la siguiente (16):

$$E = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho} \quad (16)$$

Donde:

- E es la efusividad del material ($W/(m^2 K)$)
- λ es la conductividad térmica aparente ($W/(m K)$)
- c_p es el calor específico ($J/(kg K)$)
- ρ es la densidad aparente del material evaluado (kg/m^3)

En cuanto a los requisitos del ensayo, la dimensión menor de la probeta debe ser mayor a 1 pulgada (25,4 mm) y debe presentar una superficie horizontal plana para que el ensayo pueda realizarse. En este caso, para evitar problemas de contorno debidos al tamaño de árido del mortero, se decidió emplear probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro y 80 mm de altura.

La Fig. 29 muestra la máquina lista para realizar el ensayo. Con el fin de medir en el interior de la probeta y de facilitar una superficie más uniforme y lisa, se cortaron todas las probetas con una sierra de diamante *HVSQVARNA TS-600M*. La profundidad del corte fue de aproximadamente 1,5 cm desde la parte superior de la probeta.

Por recomendación del fabricante del equipo y para asegurar un buen contacto térmico entre la probeta y el sensor se aplicó aceite de silicona *Wakefield* tipo 120, ya que su influencia en la medida estaba previamente calibrada en el equipo por el propio fabricante.

Se realizaron 3 series de 10 medidas de conductividad térmica por probeta. La conductividad térmica de cada serie se determinó a partir de la media de las 10 medidas realizadas, y el valor final de la probeta se calculó mediante la media de la media calculada para las 3 series medidas.

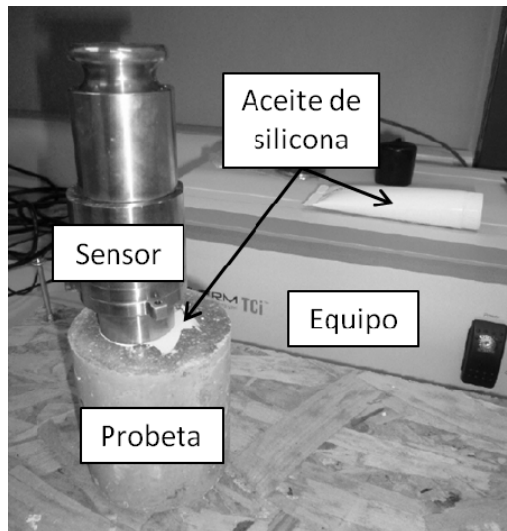


Fig. 29. Ensayo realizado con la máquina TCi de C-Therm.

3.3.5.2 TPSYS02 de Hukseflux

El equipo *TPSYS02* de *Hukseflux* permite determinar la conductividad térmica aparente del material evaluado en base a la norma ASTM D 5334-08 [105]. Esta norma calcula la conductividad térmica del material en base a la teoría de *Fuente Lineal Infinita (ILS)*. En la Fig. 30 se muestran el equipo empleado (a) y el esquema de la aguja de ensayo *TP02* de *Hukseflux* (b).

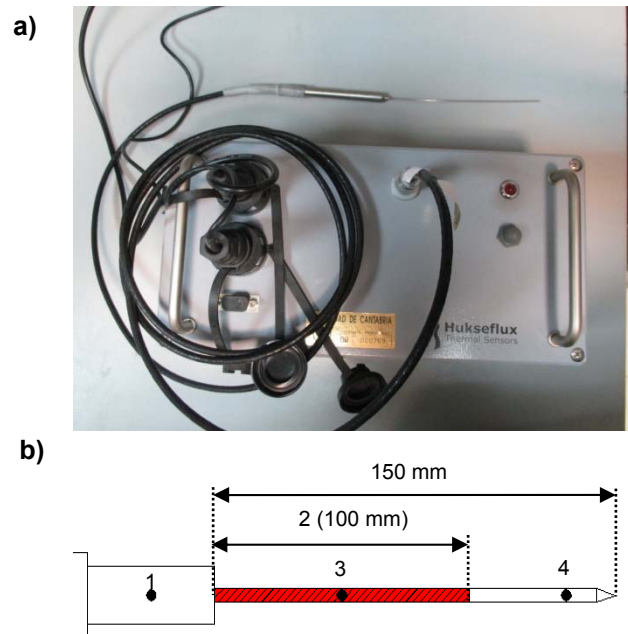


Fig. 30. Equipo TPSYS02: a) equipo, b) esquema de la aguja TP02.

La aguja de medición es de acero inoxidable de 15 cm de longitud y 1,5 mm de diámetro. Está provista de tres sensores de temperatura y una resistencia eléctrica que aporta calor, que se encuentran distribuidos como se indica en la Fig. 30b:

1. Sensor Pt1000 que mide la temperatura ambiente de la sala donde se realiza el ensayo. Permite corregir los valores de los otros dos sensores, ya que están calibrados a 20°C de temperatura.
2. Resistencia que aporta la potencia calorífica de la aguja y que se extiende en los primeros 10 cm de aguja.
3. Termopar que mide la temperatura que alcanza la resistencia del punto 2.
4. Termopar que mide la temperatura que tiene la probeta antes y durante el ensayo, controlando que la temperatura inicial permanece sin perturbar.

La medición se realiza introduciendo la aguja dentro del medio a ensayar. Es por ello que esta norma está indicada para determinar la conductividad térmica aparente de suelos y rocas blandas ya que resulta necesario realizar una perforación que permita la introducción de la aguja.

Si el suelo o roca es lo suficientemente blando, como en los ensayos realizados sobre los áridos en esta tesis, es posible introducir directamente la aguja en la probeta, lo que facilita su posterior ensayo. Sin embargo, en los ensayos realizados sobre morteros fue necesario incorporar en estado fresco unos tubos guía de acero inoxidable de 17 cm de longitud y 1,7 mm de diámetro interior. Una vez endurecido el hormigón, la aguja de ensayo se insertó dentro de esta guía creando una aguja de ensayo de mayor diámetro.

En todo caso, las dimensiones mínimas que debía cumplir la probeta venían establecidas por norma en función del tiempo de calentamiento empleado y de la difusividad térmica del propio material ensayado. Para evitar posibles problemas de contorno, se fabricaron probetas cilíndricas de 16 cm de diámetro y 20 cm de alto significativamente más grandes a las dimensiones mínimas requeridas por norma. En la Fig. 31 se muestra un ejemplo de probeta empleada para la realización del ensayo (a), la posición final del tubo guía (b) y la disposición de la aguja en el momento de ensayo (c).

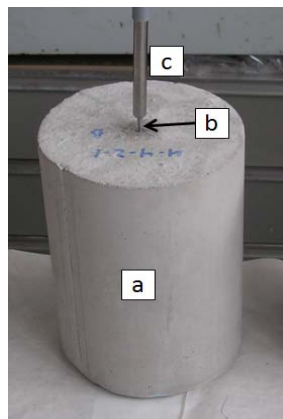


Fig. 31. a) Probeta empleada, b) posición final del tubo guía y c) disposición de la aguja en el momento de ensayo.

Una vez la probeta estaba lista para su ensayo, fue necesario humedecer la aguja con glicerina para facilitar su introducción y reducir el contacto térmico entre ambos. El tiempo total del ensayo establecido fue de 600 s. Durante los primeros 300 s el calentador estuvo apagado y solamente se registraron las temperaturas y el tiempo para comprobar la estabilidad térmica de la probeta en el momento del ensayo. En los últimos 300 s se registró la potencia térmica constante aplicada por la aguja, que se estableció en 4,5 W (equivalente a una potencia de 45 W/m de intercambiador geotérmico). Como resultado, el equipo proporcionó la siguiente información:

- T_{amb} es la temperatura ambiente de la sala (°C).
- T_0 es la temperatura inicial de la probeta (°C).
- $\Delta T(t)$ es la diferencia de temperatura observada durante el ensayo en los sensores 3 y 4 mostrados en la Fig. 31b (°C)
- Q es la potencia calorífica aportada. (W)

La conductividad térmica se obtuvo a partir de la ecuación (17), donde λ es la conductividad térmica del terreno y s es la pendiente del ajuste lineal por mínimos cuadrados realizado sobre la curva $\Delta T = f(\ln(t))$ (Fig. 32).

$$\lambda = \frac{Q}{4 \times \pi \times s} \quad (17)$$

El intervalo de tiempo establecido se decidió para cada material de manera visual. En este caso, se determinó un intervalo de 20 a 300 s ($3 \leq \ln(t) \leq 5,6$) para todos los ensayos realizados. Finalmente, al tratarse de un ensayo no destructivo, la conductividad térmica de cada probeta se determinó a partir de tres ensayos realizados sobre la misma.

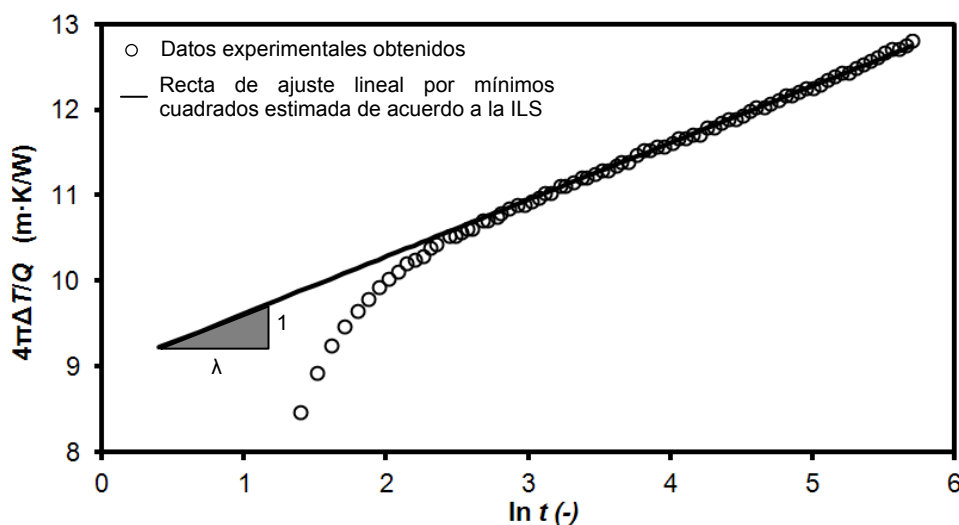


Fig. 32. Análisis de la curva en escala logarítmica y ajuste por mínimos cuadrados.

3.3.6 RESISTENCIA DE ADHERENCIA

El ensayo de resistencia de adherencia de las sondas de polietileno de alta densidad (PEAD) al relleno se planteó con el objetivo de analizar el deterioro del contacto entre la sonda geotérmica y el relleno, que podría dar lugar a un aumento de la resistencia térmica de la perforación. [46]. Aunque no existía ningún ensayo normalizado, se tomó como referencia el trabajo realizado por Allan *et al.* [42].

El ensayo consiste en determinar la fuerza de compresión que es necesaria aplicar sobre el tubo de PEAD embebido en el mortero para que éste se desprenda del mismo. Las dimensiones de la probeta empleada y la situación del tubo en su interior se muestran en la Fig. 33 a y b. Para posibilitar el desplazamiento vertical descendiente del tubo, se creó un hueco cilíndrico de 9 mm de alto y 40 mm de diámetro en la parte inferior de la probeta. Debido al molde empleado para la fabricación de la probeta, la altura a partir de la cual el tubo entra en contacto directo con el mortero fue de 19 mm. Como la altura total de la probeta se estableció en 124 mm, la altura de contacto entre el tubo y el mortero fue de 105 mm. Por último, el tubo de PEAD sobresale 20 mm por encima de la cara superior del mortero. Por todo ello, la longitud del tubo de PEAD embebido fue de 135 mm.

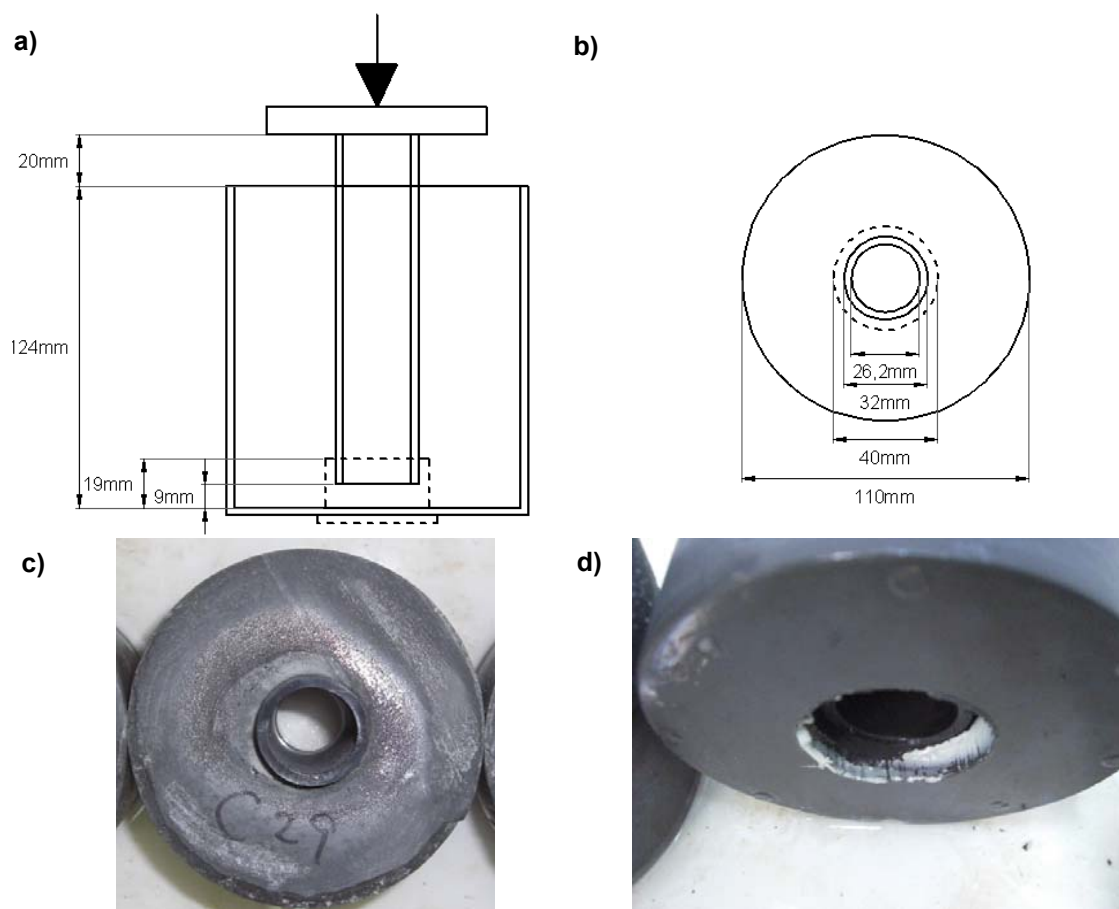


Fig. 33. Probeta empleada en el ensayo de adherencia: a) alzado, b) planta, c) probeta resultante, d) detalle del hueco creado en el fondo para el descenso del tubo.

El procedimiento de ensayo fue similar al de un ensayo convencional de compresión simple, y fueron realizados con la máquina modelo Z100 de Zwick, cuya capacidad de carga máxima era de 100 kN. La Fig. 34 muestra la máquina empleada y la disposición de la probeta durante la realización del ensayo.

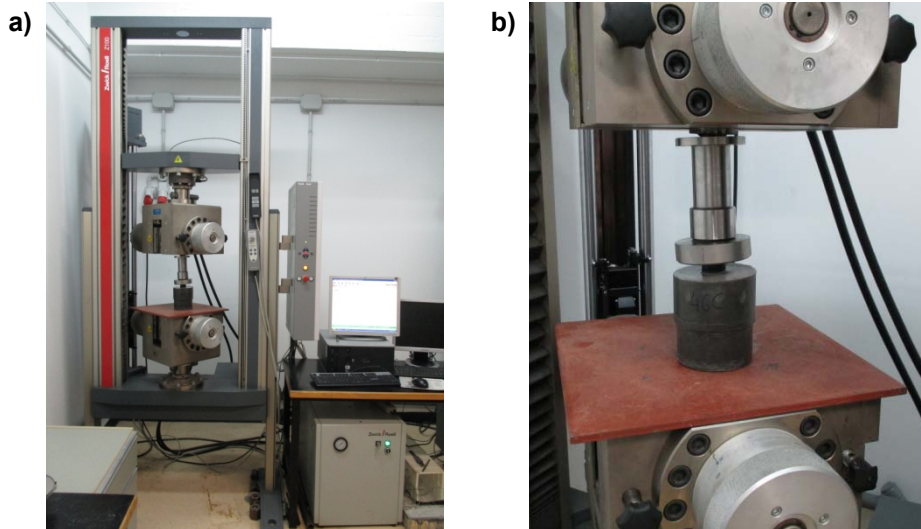


Fig. 34. Realización del ensayo de adherencia: a) máquina empleada, b) probeta durante el ensayo.

El ensayo se realizó a una velocidad de carga constante de 25 N/s en base a los resultados obtenidos por Allan *et al.* [42], registrándose a su vez el desplazamiento vertical del tubo. Para evitar daños indeseados al equipo de ensayo se estableció un desplazamiento máximo de 5 mm. Como resultado, se obtuvo una curva de fuerza-desplazamiento, de la cual se anotó el esfuerzo máximo aplicado (F_c).

3.4 INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS.

3.4.1 DOSIFICACIONES PROPUESTAS

La composición básica de los morteros a estudiar fue una mezcla de cemento, superplastificante, un único tipo de árido y agua.

La cantidad de superplastificante empleada fue la máxima permitida por el fabricante, 2% respecto al cemento en peso, ya que el objetivo era conseguir la máxima reducción de agua posible.

En este apartado se evaluaron tanto la influencia del tipo de árido como su proporción dentro de cada mezcla. Para ello, por cada uno de los 4 áridos principales propuestos (C, S, EAE y RCD) se establecieron 3 proporciones de árido respecto al cemento en peso, resultando en 12 dosificaciones de mortero diferentes. Como material de referencia se realizó una lechada de cemento (L). Ésta representó la ausencia de árido con una proporción ya establecida de agua respecto al cemento en peso de 0,3 similar a la propuesta por Allan *et al.* [45].

Finalmente, en las dosificaciones propuestas fue necesario determinar la cantidad de agua requerida por la mezcla de acuerdo a la consistencia de 260-300 mm establecida según el ensayo de la mesa de sacudidas UNE-EN 1015-3:2000/A2 (w/c_{inicial}). Para ello, se realizaron al menos 4 amasadas por cada dosificación propuesta, variando la cantidad de agua empleada hasta que el resultado obtenido resultó dentro del rango establecido. Dado el número de ensayos previsto, este proceso se realizó con amasadas de tamaño reducido, para lo cual se empleó una amasadora de morteros de dos velocidades contemplada en la propia norma UNE-EN 1015-3:2000/A2 (Fig. 35).

El procedimiento de amasado se estableció teniendo en cuenta que para facilitar el uso posterior en obra de los morteros diseñados, el mortero suele llevarse en seco en sacos confeccionados previamente en la central. Así, el procedimiento seguido fue:

- Se añadieron el árido, el cemento y el superplastificante a la amasadora y se mezcló en seco a velocidad lenta durante 60 s.
- Manteniendo la amasadora a velocidad lenta, se añadió el agua de forma continua durante 15 s y se prolongó el amasado durante 60 s adicionales.
- Se aumentó la velocidad de amasado durante los siguientes 60 s.
- Se dejó el mortero en reposo durante 90 s.
- Se volvió a amasar a alta velocidad durante otros 60 s.



Fig. 35. Amasadora de eje vertical.

Posteriormente se reajustó la cantidad de agua en aquellos casos en los que la amasada de mayor dimensión resultó fuera del rango de consistencias establecido (w/c_{final}). Para las 13 dosificaciones fue necesaria la realización de un total de 24 amasadas. En la Tabla 15 se presenta la relación agua/cemento inicialmente estimada y la finalmente empleada en las amasadas realizadas para la confección de las distintas probetas de mortero.

Tabla 15. Dosificaciones inicialmente calculadas y las finalmente empleadas.

ID	s_1	s_2	s_1/c	s_2/c	Sp/c	$w/c_{calculado}$	w/c_{final}
L	0	0	0	0	0,02	0,30	0,30
C ₁	C	0	1	0	0,02	0,30	0,30
C ₂	C	0	2	0	0,02	0,37	0,37
C ₃	C	0	3	0	0,02	0,46	0,43
S ₁	S	0	1	0	0,02	0,36	0,34
S ₂	S	0	2	0	0,02	0,47	0,50
S ₃	S	0	3	0	0,02	0,56	0,54
EAE ₁	EAE	F	0,75	0,25	0,02	0,31	0,31
EAE ₂	EAE	F	1,50	0,50	0,02	0,41	0,40
EAE ₃	EAE	F	2,25	0,75	0,02	0,49	0,49
RCD ₁	RCD	F	0,90	0,10	0,02	0,42	0,40
RCD ₂	RCD	F	1,80	0,20	0,02	0,63	0,62
RCD ₃	RCD	F	2,70	0,30	0,02	0,96	0,93

C: Arena caliza

S: Arena silíceas

EAE: Escoria de acería de horno de arco eléctrico

RCD: Residuos de construcción y demolición

s_1 y s_2 : árido principal y secundario, respectivamente

s/c : proporción de árido respecto al cemento en peso

Sp/c : proporción de superplastificante respecto al cemento en peso

w/c : es la relación de agua respecto al cemento en peso

3.4.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ENSAYO

Por cada dosificación propuesta se realizó una amasada de 20-25 l, empleando una amasadora planetaria de 150 l de capacidad (Fig. 36).



Fig. 36. Amasadora planetaria empleada.

Debido al tamaño máximo de árido empleado y a la cantidad de finos de los morteros, en las primeras amasadas se detectaron problemas de amasado debido a la adhesión de la mezcla a las paredes de la hormigonera y a la formación de grumos. Para minimizar estos problemas, se estableció el siguiente procedimiento de amasado:

1. Se prehumedeció la amasadora y se eliminó el agua sobrante.
2. Se añadieron la arena y el filler (cuando procediera) a la amasadora y se mezclaron los materiales en seco durante 30 s.
3. Se añadió la mitad del agua de amasado para prehumedecer el árido, y se mezcló durante al menos 2 min. En el caso del RCD, el tiempo de amasado se aumentó a 10 min dada la gran absorción de este tipo de árido [106].
4. Se detuvo la máquina y se despegó el árido humedecido de las paredes de la amasadora.
5. Se añadieron el cemento y el superplastificante y se mezclaron con el árido húmedo durante 1 min.
6. Durante los siguientes 15-30 s, y sin parar el equipo, se fue añadiendo de forma constante la mitad del agua de amasado restante por la parte superior de la amasadora, sin abrirla.
7. Una vez añadida toda el agua, se amasó la mezcla durante 3 min más.
8. Se paró la amasadora durante 2 min para que reposara la mezcla. Este tiempo se aprovechó para comprobar que no se había quedado material adherido a la amasadora.
9. Se amasó de nuevo durante 2 min.
10. Se dejó reposar durante 2 min.
11. Se amasó por última vez durante otros 2 min.

Inmediatamente después de la finalización del amasado, se recogió una muestra de 5 l y se realizaron los ensayos de consistencia mediante la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3:2000/A2), con el que se determinó la validez de cada amasada. A continuación, se realizó el ensayo de densidad aparente del mortero en fresco (UNE-EN 1015-6:1999), antes de proceder al relleno de los moldes.

Para cada dosificación propuesta se fabricaron un total de 3 probetas de conductividad térmica y 6 probetas de flexión y compresión simple, con las que además se determinó la densidad aparente en endurecido y porosidad accesible al agua del mortero.

En primer lugar, se dejó curar el mortero a temperatura ambiente y cubierto con un plástico para preservar el agua de amasado durante 48 h antes de proceder a la retirada de los moldes. Desde ese momento y hasta que las probetas alcanzaron la edad de curado establecida para cada ensayo, las probetas se sumergieron en agua a 20°C de acuerdo a la norma UNE-EN 12390:2009.

Debido a la ausencia de árido de la lechada de cemento, el mortero L se amasó mediante un mezclador de morteros acoplado a una taladradora (Fig. 37). El procedimiento de amasado empleado fue el siguiente:



Fig. 37. Mezclador acoplado al taladro empleado para amasar la lechada de cemento.

1. Antes de realizar la mezcla con agua, se pre-mezcló el cemento con el superplastificante en seco para asegurar una distribución más homogénea del mismo.
2. Se añadió el agua de amasado necesaria al recipiente de mezclado.
3. Se añadió de manera progresiva la mezcla de cemento y superplastificante sin detener el amasado para asegurar una mejor disolución del cemento en el agua
4. Una vez añadido todo el cemento, se prolongó el amasado hasta los 10 min establecidos.

3.5 DURABILIDAD DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO

3.5.1 CICLOS DE HIELO-DESHIELO

Los ciclos de hielo-deshielo se plantearon con el objetivo de analizar el deterioro que sufrirá durante el invierno una instalación geotérmica que esté infra-dimensionada. En un principio en España las instalaciones se dimensionan para que la temperatura del relleno en ningún momento descienda por debajo de los 0°C. Sin embargo, las condiciones climatológicas pueden hacer que el relleno cercano a la superficie se congele. Por otra parte, si la bomba de calor no tiene limitada la temperatura de funcionamiento para temperaturas menores a 0°C, es posible que durante las cargas pico que sufra el edificio el relleno quede expuesto a temperaturas que lo congelen.

En el momento de realización de esta tesis existían diferentes normas que establecían metodologías para la determinación del daño causado sobre un material debido a la acción del ciclo de hielo-deshielo (UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX, UNE-EN_14617-5=2012, UNE-EN_15304=2009, ASTM C666/C666M-03). Todos los métodos existentes basaban su efectividad en realizar el daño sobre la superficie expuesta de la probeta. Sin embargo, en el caso de los morteros geotérmicos el mayor daño ocurre desde el interior cuando el fluido portador de calor alcanza temperaturas inferiores a 0°C. Por lo tanto, la duración de los ciclos térmicos debía de ser suficiente como para asegurar una completa congelación de toda la probeta, en especial de su interior.

En esta tesis se optó por adecuar los ciclos térmicos propuestos en la norma UNE-EN 12390-9 para analizar el deterioro de las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del mortero utilizado como relleno geotérmico. De esta manera, cada ciclo térmico consistió en congelar las probetas durante 24 h a -17°C y sumergirlas en agua a 15°C durante otras 24 h.

Dado que antes de la aplicación de los ciclos de hielo-deshielo las probetas se encontraron sumergidas durante 28 días en agua, se consideró que las probetas, en el momento en el que se introdujeron al congelador, retenían la cantidad de agua almacenada durante la inmersión en agua. Durante el tiempo en el que la probeta se metía en el congelador, no estaba sumergida bajo el agua, por lo que es posible que la probeta no estuviera saturada en superficie.

De todas las probetas sometidas a los ciclos, las de conductividad térmica fueron las de mayor volumen, por lo que fueron escogidas para comprobar que tras 24h en el congelador su temperatura en el interior era similar a la del congelador. Para ello, inmediatamente después de sacar las probetas del congelador, se introdujo la aguja-sensor de temperatura de la máquina *TPSYS02* de *Hukseflux*, obteniéndose una temperatura aproximada de -15 °C en el interior de las probetas de todos los tipos de

mortero evaluados. De manera similar, se comprobó que tras 24h de inmersión las probetas de conductividad presentaban una temperatura de $15\pm 2^{\circ}\text{C}$ en su interior, lo que se confirmó durante la realización de los ensayos de conductividad térmica.

La Fig. 38 muestra la sección transversal de un sistema vertical geotérmico y las diferentes condiciones de saturación en las que el relleno puede sufrir el daño debido a los ciclos de hielo-deshielo. Por encima del nivel freático (1) el terreno se encuentra parcialmente saturado, por lo que la cara accesible del relleno también estará parcialmente saturada. Sin embargo, la parte interior del relleno, que está en contacto con las sondas geotérmicas, se encuentra sin saturar ya que se requiere una mayor presión para que el agua sea capaz de penetrar en ella. Una vez el relleno se encuentra por debajo del nivel freático (2), el terreno en contacto directo con el relleno se encuentra saturado de agua, por lo que parte del relleno también se saturará de agua. Sin embargo, el relleno en contacto con las sondas estará aún sin saturar debido a la mayor presión hidrostática requerida para su saturación. Por lo tanto, el grado de saturación del relleno aumentará a medida que aumenta la presión hidrostática que actúa sobre el relleno. Por último, puede existir una zona en la cual el relleno se encuentre saturado al completo debido a la gran presión hidrostática existente (3).

Dado que la saturación de las probetas se realizó únicamente por inmersión en agua, el daño producido en laboratorio representará las situaciones 1 y 2 de la Fig. 38.

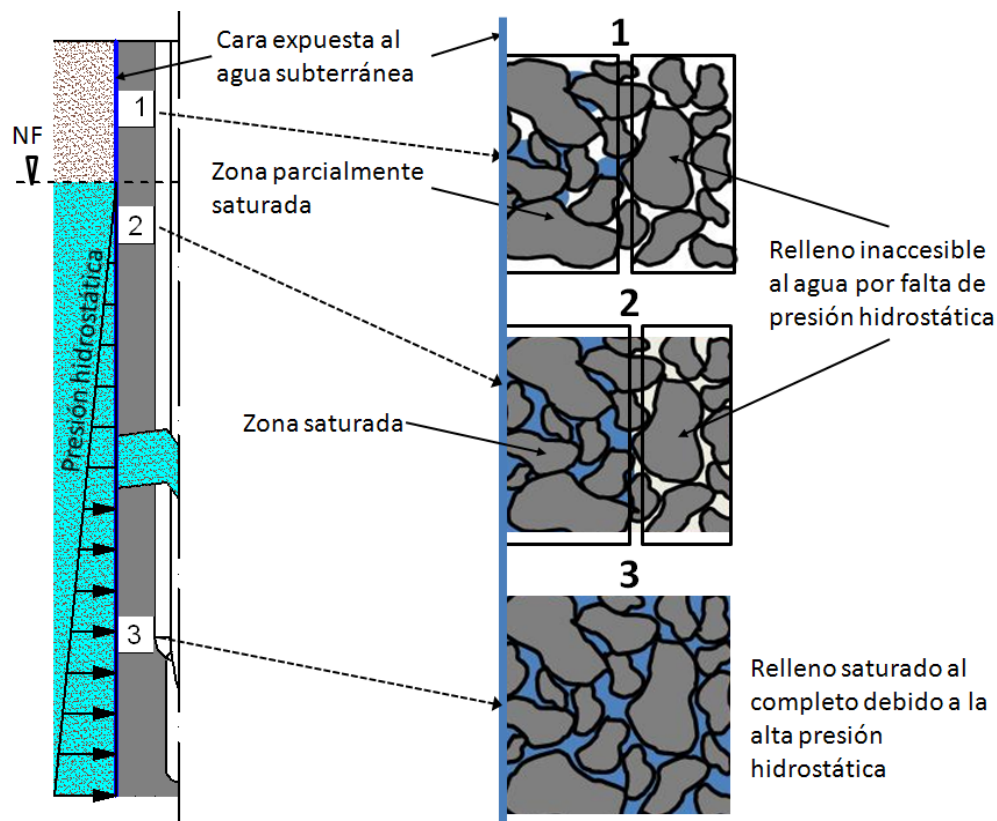


Fig. 38. Grados de saturación del relleno posibles en función de la profundidad de la perforación.

3.5.2 DOSIFICACIONES EMPLEADAS

Las dosificaciones empleadas durante esta fase de la investigación se obtuvieron como resultado del análisis realizado en el apartado 3.6.1. Sin embargo, la cantidad de agua requerida por la mezcla se volvió a determinar para que cumpliera el rango de consistencia establecido, debido a los cambios realizados en el procedimiento de amasado. Las dosificaciones finalmente empleadas se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Dosificación de los rellenos empleados en el análisis de durabilidad.

	Material de relleno				
	L	C	S	EAE	RCD
Cemento (c)	CEM II/B(V) 32,5R (UNE-EN 197-1)				
Árido 1 (s ₁)	-	C	S	EAE	RCD
A ₁ /c	-	2	2	1,5	1,80
Árido 2 (s ₂)	-	-	-	F	F
A ₂ /c	-	0	0	0,5	0,20
Superplastificante (SP)	Melment F10®				
SP/c	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Proporción de agua/cemento (w/c)	0,3	0,39	0,43	0,42	0,66

3.5.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ENSAYO

Por cada dosificación propuesta se realizaron dos amasadas de 70 l para la confección de todas las probetas necesarias en esta fase. Si bien la lechada (L) se fabricó según el mismo procedimiento al explicado en el apartado 3.4.2, para el resto de amasadas se optó por sustituir la amasadora empleada dicha previamente por la hormigonera de tambor basculante que se muestra en la Fig. 39, ya que eran más fácilmente obtenibles en obra.



Fig. 39. Amasadora de tambor basculante empleada.

De forma análoga a lo que ocurrió con la amasadora planetaria, en las primeras amasadas realizadas con la amasadora de tambor se detectaron problemas de amasado debido a la adhesión de la mezcla a las paredes del tambor y a la formación de grumos, aunque en este caso fueron de menor importancia. Para minimizar estos problemas, se llevó a cabo el mismo procedimiento de amasado explicado en el apartado 3.4.2.

Inmediatamente después de la finalización del amasado, se recogió una muestra de 5 l y se realizó el ensayo de consistencia mediante la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3:2000/A2). Con este ensayo se determinó la validez de la amasada y la densidad aparente del mortero en fresco (UNE-EN 1015-6:1999), antes de proceder al relleno de los moldes.

Las propiedades físicas, térmicas y resistentes de los morteros una vez endurecidos se determinaron a partir de los ensayos de densidad aparente del mortero endurecido (UNE-EN 1015-10:1999/A1:2006), de la resistencia a flexión y compresión simple (UNE 1015-11:2000/A1:2007), del ensayo de adherencia al tubo de PEAD propuesto por Allan *et al.* [42] y de la conductividad térmica aparente (ASTM D-5334-08).

Por todo ello, para la realización de todos los ensayos en endurecido necesarios en esta fase de la tesis, fue necesaria la fabricación de 21 probetas de flexión, 21 probetas de adherencia y 6 probetas de conductividad térmica por cada una de las dosificaciones analizadas. La Fig. 40 muestra las probetas inmediatamente después del llenado de los moldes.



Fig. 40. Probetas realizadas para el análisis de durabilidad de una de las dosificaciones propuestas.

A continuación se dejó que el mortero curara a temperatura ambiente cubierto con un plástico para preservar el agua de amasado durante 48 h, de forma que el mortero alcanzara la resistencia suficiente para que fuera posible la retirada de los moldes. Desde ese momento y hasta que las probetas alcanzaran los 28 días de curado, las probetas fueron sumergidas en agua a 20°C, tal y como indica la norma UNE-EN 12390:2009.

A los 28 días de curado se determinaron las condiciones iniciales del relleno. De las 18 probetas de flexión y compresión simple y de adherencia aún sin ensayar, la mitad se destinaron a la realización de los ciclos de hielo-deshielo y la otra mitad se mantuvieron sumergidas en agua a 15°C para determinar la influencia de la edad de curado en los resultados obtenidos y así poder cuantificar la influencia real de las probetas sometidas al hielo-deshielo. Como tanto los métodos de determinación de la densidad aparente en endurecido como el de la conductividad térmica aparente del relleno eran no destructivos, se emplearon las mismas probetas para cada tratamiento durante todo el proceso. Tras la realización de 7, 14 y 25 ciclos térmicos, se determinaron las propiedades de las probetas sometidas a los dos tratamientos en paralelo.

3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.6.1 INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS

3.6.1.1 Introducción

En este apartado se muestran todos los resultados de caracterización física, térmica y mecánica realizados para el análisis de la influencia del tipo y proporción de árido empleado en la confección de morteros geotérmicos.

Los resultados se encuentran estructurados en función del ensayo realizado. En primer lugar, se indica el número y las condiciones de realización de los ensayos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos, para finalizar con su interpretación. Los resultados tanto de las amasadas de cálculo como los relativos a la confección de probetas se encuentran en el anexo de resultados A1.

3.6.1.2 Densidad aparente en fresco

En la Fig. 41 se presentan los resultados de densidad aparente en fresco obtenidos para las 13 amasadas tomadas como válidas. Cada una de las curvas representa a un tipo de árido diferente, en el que se varía la proporción de árido empleada. Sin embargo, las cuatro curvas parten del mismo punto: el que representa la ausencia de árido (L).

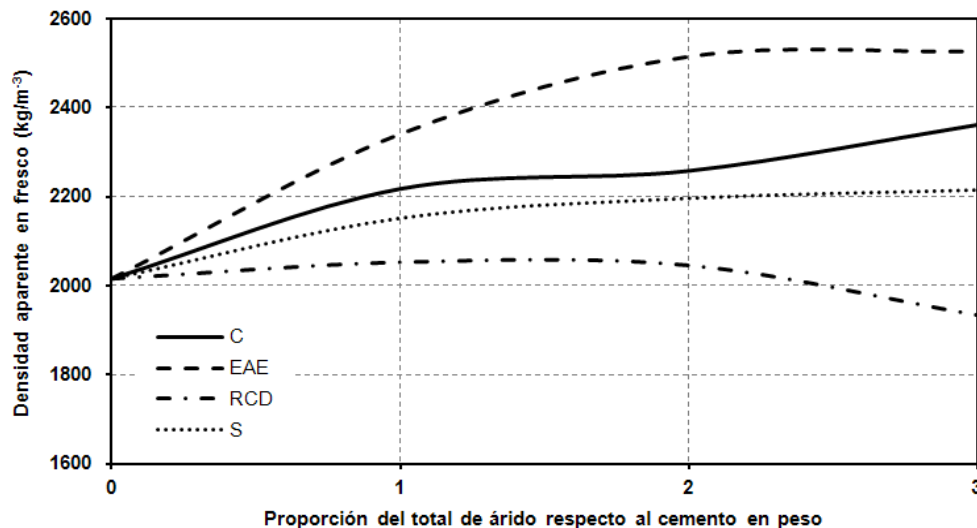


Fig. 41. Densidades del mortero fresco para los diferentes áridos y proporciones analizadas.

En primer lugar, se observó que la densidad en fresco del material dependía tanto del tipo de árido empleado como de su proporción en la mezcla. El hecho de que ninguna de las curvas se cruzara entre sí mostró que cuanto mayor densidad de partículas tenga el árido empleado, mayor era la densidad final del mortero resultante. Por otra

parte, se apreció que todos los áridos excepto el RCD aumentaron la densidad en fresco del mortero al aumentar su proporción en la mezcla. El descenso de la densidad observado en el caso del RCD (mortero R_3) se debió a la gran absorción de agua del árido, 5,07%, que aumentó de manera significativa la proporción de agua requerida por la mezcla. En cuanto al árido calizo, el mortero C_1 presentó valores similares al C_2 . La mayor densidad que debía tener el mortero C_2 debido a su mayor proporción de árido se compensó con la menor densidad de la mezcla de cemento-superplastificante-agua, causada por el aumento de la proporción agua cemento (w/c fue de 0,34 para el C_1 y de 0,5 para el C_2).

Por otra parte, todos los rellenos tenían una mayor densidad que los lodos de perforación más comúnmente empleados, de valor 1050 kg/m³ [107], por lo que no se esperaban problemas para extraer el lodo de perforación durante la inyección de los rellenos en los intercambiadores de calor.

3.6.1.3 Densidad aparente en endurecido y porosidad accesible

Los resultados de densidad aparente en endurecido y porosidad finales de todos los morteros fabricados se determinaron a los 28 días de curado. La Fig. 42 muestra la relación entre la densidad aparente en endurecido (a) y la porosidad accesible (b) en función de la proporción de árido empleada para los morteros propuestos.

En primer lugar, se apreció cómo la utilización de cualquiera de los áridos aumentó la densidad aparente en endurecido del mortero resultante. Al igual que en el caso de la densidad en fresco, la densidad de partículas del árido empleado explicó en gran medida las diferencias observadas para los diferentes áridos propuestos. Sin embargo, la densidad aparente en endurecido presentó un máximo para una proporción de árido respecto al cemento en peso de 2 para los áridos C, EAE y RCD. En cambio, el árido S aumentó la densidad del mortero resultante independientemente de la proporción empleada.

La porosidad accesible de los morteros de EAE y S fue similar fuera cual fuera la proporción de árido empleada, mientras que los áridos C y RCD presentaron una porosidad accesible mínima para una proporción de árido/cemento de 2. El árido C presentó en todos los casos una porosidad menor a las del resto de áridos, con un valor mínimo del 8,7% para la mezcla C_2 , debido a su distribución granulométrica, a su baja absorción de agua y a su menor cantidad de finos en relación al resto de áridos empleados. Por último, cabe destacar el gran incremento de porosidad observado en el caso del RCD, alcanzando el 35% de volumen del mortero resultante para la mezcla R_3 .

Una vez endurecido el mortero, parte del agua necesaria para cumplir el rango de consistencia establecido se perdió lo que afectó a su densidad aparente en endurecido y a su porosidad accesible. Cuanto mayor fue la proporción de agua respecto al cemento de la mezcla, mayor fue la porosidad accesible y menor fue la densidad aparente en endurecido del mortero. En el caso del RCD, este hecho tomó especial relevancia, ya que debido a la alta absorción de agua del árido la proporción de agua respecto al cemento creció de manera significativa.

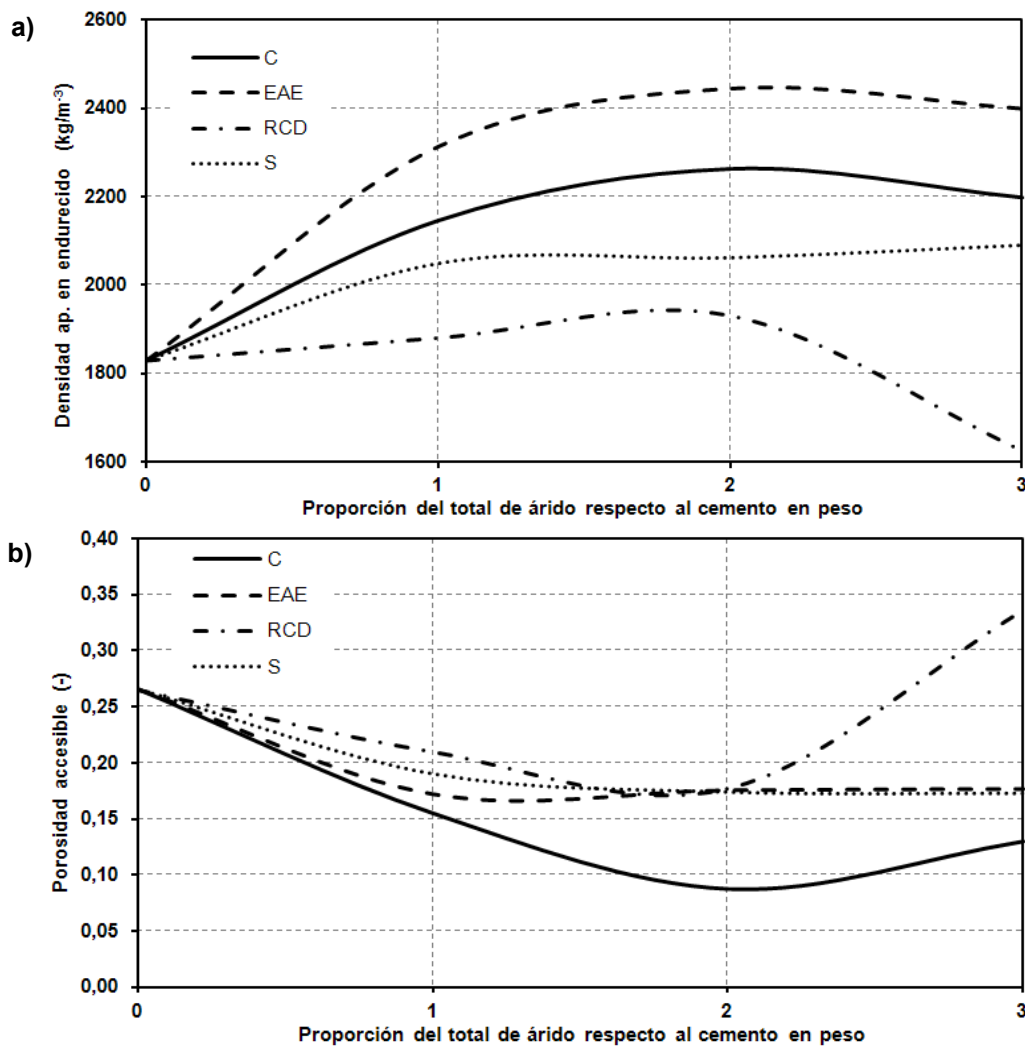


Fig. 42. a) Densidad aparente en endurecido y b) porosidad accesible en función de la proporción de árido empleada.

3.6.1.4 Resistencia a compresión simple

Los resultados finales a compresión simple se determinaron a los 7 y 28 días de curado mediante la rotura de 3 probetas por variable a estudiar. La Fig. 43 muestra la relación entre la resistencia a compresión y la proporción de árido respecto al cemento en peso para cada uno de los áridos empleados, para una edad de (a) 7 días y (b) 28 días. Cada una de las curvas mostrada representa el conjunto de morteros en el que

se ha empleado un único árido de los 4 principales empleados. Dado que la lechada representa la ausencia de árido, todas las curvas parten de ese punto común.

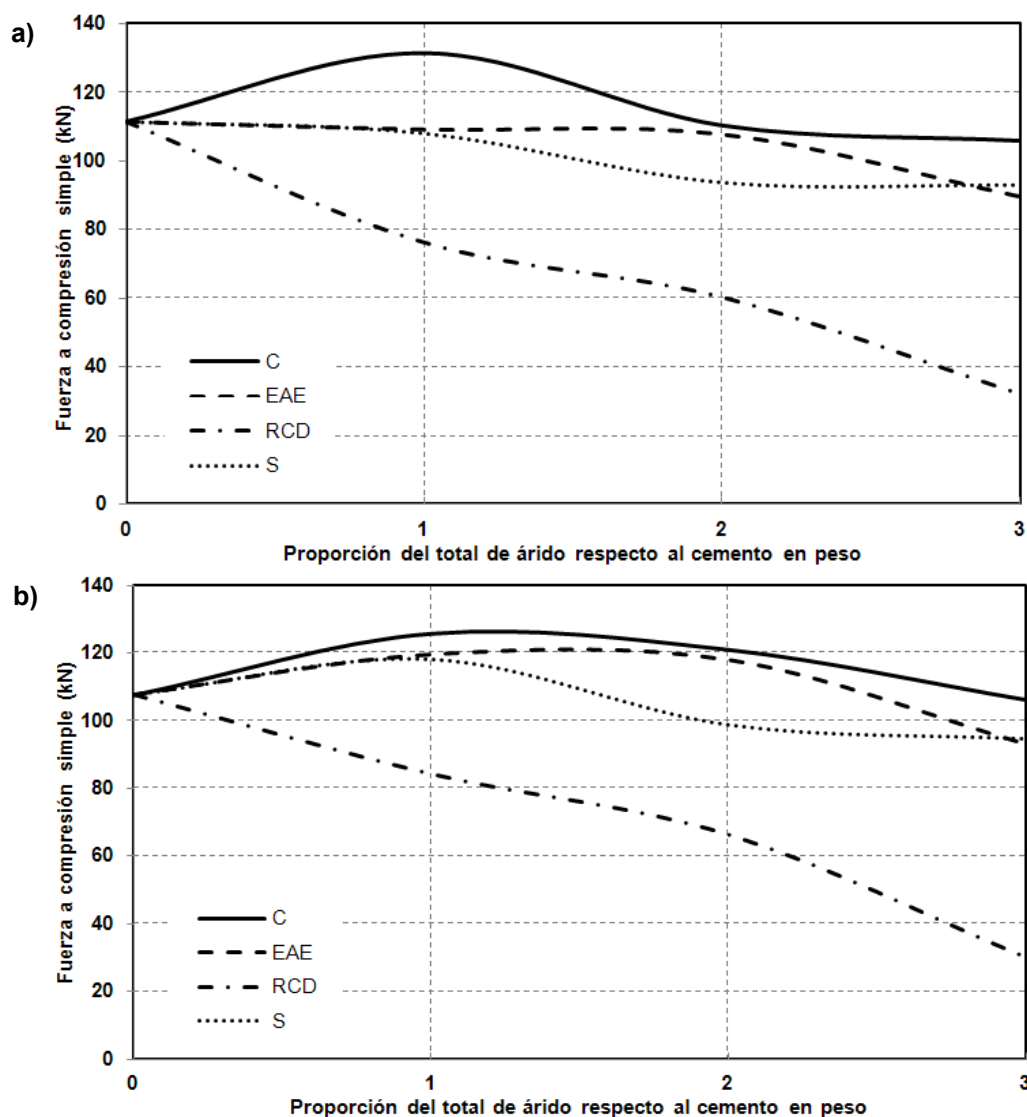


Fig. 43. Fuerza a compresión: a) a los 7 días y b) a los 28 días de curado.

Para ambos tiempos de curado, y tomando como referencia la resistencia a compresión de la lechada de cemento (ausencia de árido), se observó que el árido S, presentaba un máximo para la relación de árido/cemento de 1, siguiendo una trayectoria descendiente a partir de ese punto. Para los áridos C y EAE también se apreció una tendencia similar, si bien los resultados obtenidos para las relaciones de árido/cemento de 1 y 2 fueron similares.

Por otra parte, el árido calizo contó con una mayor resistencia a compresión que el resto de áridos en todos los casos analizados, si bien los valores obtenidos para la EAE fueron similares a los 28 días de curado. Para todas las relaciones de árido cemento analizadas y tomando como referencia los valores de resistencia a compresión de la arena caliza, se apreció que a los 7 días la EAE presentó un

descenso de la resistencia de hasta un 20% para la muestra EAE₁. Sin embargo, este valor se redujo a menos de un 5% a los 28 días, lo que indicó una ganancia de resistencia a largo plazo del mortero debido a la hidraulicidad tanto de la ceniza volante contenida en el cemento como de la EAE [89,93,96,97].

En cuanto a las dosificaciones realizadas con RCD, cabe destacar el claro descenso que implica su uso en la resistencia a compresión resultante. A diferencia de los otros áridos analizados, el RCD en ningún momento aumentó la resistencia a compresión del mortero. La muestra RCD₃ contó con una resistencia a compresión de 29 kN, lo que supuso una disminución de resistencia de hasta el 72% respecto al de la lechada tomada como referencia. Sin embargo, este valor se consideró suficiente ya que los morteros analizados no tienen fines estructurales.

Por último, cabe destacar que la resistencia a compresión de cualquiera de las mezclas realizadas con los áridos C, EAE y S fue superior a 88 kN (55 MPa), lo que indicó su uso potencial como hormigón estructural en pilotes geotérmicos. Sin embargo, es necesario un análisis más exhaustivo de los parámetros resistentes de los morteros analizados que permita comprobar el cumplimiento de lo establecido en la normativa correspondiente.

Por otra parte, se realizó una inspección visual de las secciones de rotura obtenidas a partir de este ensayo. La Fig. 44 muestra, como ejemplo, el caso de las amasadas C₃, S₂ y EAE₂. En un principio se estableció una consistencia en estado fresco según la mesa de sacudidas de 260-300 mm, de manera que se asegurara la autocompactabilidad del relleno. Si bien esta propiedad se comprobó durante el llenado de las probetas de densidad aparente en fresco, así como en el resto de probetas fabricadas, en la sección de rotura de las probetas de flexión de la mayor parte de los morteros se apreciaron poros esféricos que indicaban la presencia de aire ocluido en su interior. Esto se debió probablemente a la falta de una columna de mortero fresco de mayor altura que aportara peso propio y que asegurara así su compactación.

Sin embargo, el relleno en su inyección en obra está sometido a presiones mayores de compactación a la atmosférica de este caso debido a la acción de compresión de su propio peso. Por lo tanto, es de esperar que la cantidad de aire ocluido del relleno en la instalación sea menor al observado en laboratorio.

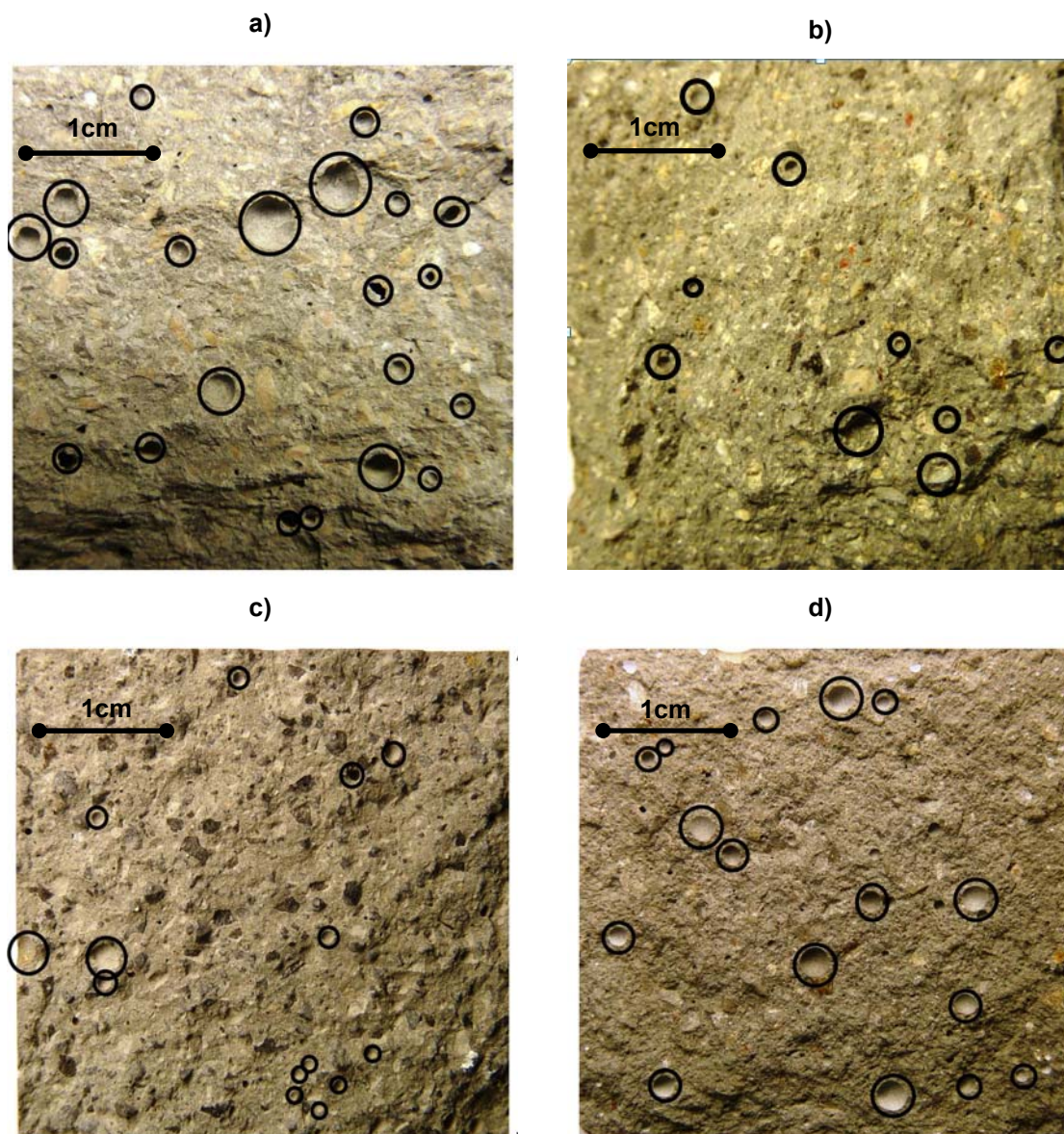


Fig. 44. Poros observados en la sección de rotura de las amasadas realizadas: a) huecos en C_2 , b) huecos en RCD_2 , c) huecos en EAE_2 y d) huecos en S_2 .

3.6.1.5 Conductividad térmica aparente

La conductividad térmica aparente se midió tras secado en estufa hasta masa constante con el equipo *TCi* de *C-Therm* a los 28 días de curado.

La Fig. 45 muestra la influencia del tipo y proporción de árido empleado en la conductividad térmica del mortero medida en laboratorio. Los resultados obtenidos indicaron que fuera cual fuera el tipo y proporción de árido empleado, la conductividad térmica resultante sería siempre mayor a la de la lechada de cemento, que representaba la ausencia del mismo. Por otra parte, el hecho de que las curvas correspondientes a cada árido no se cruzaran indicó que el tipo de árido ejerció una mayor influencia sobre la conductividad térmica que la proporción en el que se usó.

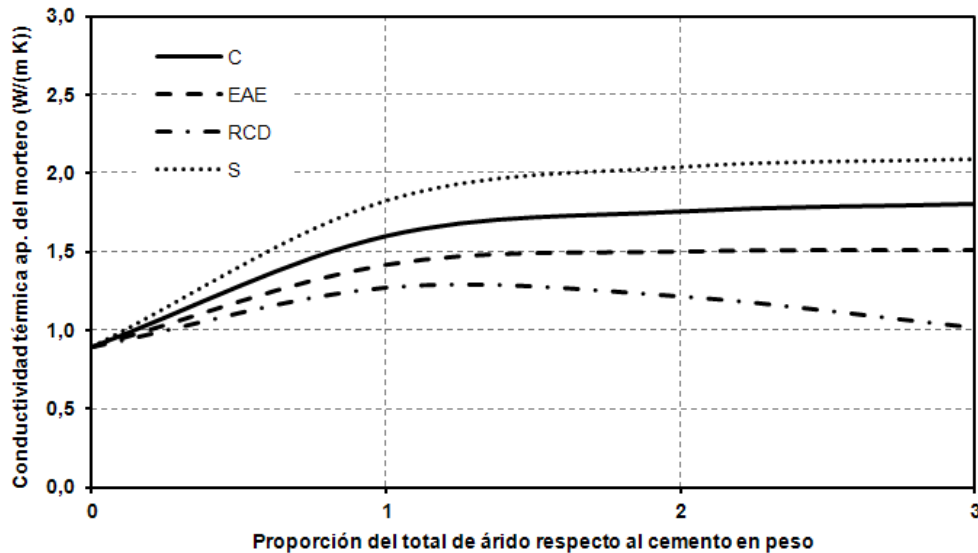


Fig. 45. Conductividad térmica del mortero en función del tipo y proporción de árido empleado.

Sin embargo y al igual que en los ensayos ya analizados, el RCD presentó un comportamiento térmico diferente al de los áridos C, EAE y S. En el caso de los áridos C, EAE y S la adición de una mayor proporción de árido supuso un incremento de la conductividad térmica medida. El RCD en cambio presentó un máximo de 1,27 W/(m K) para la muestra R₁ y sufrió un descenso progresivo hasta valores cercanos a los de la lechada tomada como referencia.

El mortero se consideró como un material compuesto por partículas sólidas (árido), pasta endurecida (agua-superplastificante-cemento) y huecos que podían estar rellenos de aire o agua. La contribución de cada uno de estos componentes a la conductividad térmica efectiva del mortero (λ_m) era desconocida. Al secar las probetas previamente secadas en estufa, se consideró que su valor dependía de las conductividades térmicas de la pasta endurecida (λ_p), de las partículas de árido (λ_s) y del aire ocluido en los poros (λ_a), así como de la proporción volumétrica que ocupara cada uno de ellos (V_s , V_p y V_a).

Se asumió que la porosidad accesible calculada representaba el aire ocluido en el mortero (V_a). La porosidad no accesible se consideró como parte interna de la pasta endurecida. Para la determinación de V_s , fue necesario calcular la proporción de árido empleada en la mezcla por volumen. Como las dosificaciones fueron propuestas por peso, para el cálculo de V_s resultó necesario asumir que la proporción en volumen del árido era la misma en el mortero en fresco y una vez endurecido. En ese caso, V_s se calculó a partir de la ecuación (18):

$$V_s = \frac{\rho_f \cdot (s/c)}{\rho_s \cdot (1 + s/c + sp/c + w/c)} \quad (18)$$

Donde:

- ρ_f es la densidad aparente en fresco del mortero
- ρ_s es la densidad aparente de partículas del árido
- s/c es la proporción en peso total de árido respecto al cemento
- sp/c es la proporción de superplastificante respecto al cemento en peso
- w/c es la proporción de agua respecto al cemento en peso

Por último, la proporción volumétrica ocupada por la pasta se calculó a partir de la ecuación (19).

$$V_p = 1 - V_s - V_a \quad (19)$$

En cuanto a la conductividad térmica del aire, su valor a presión atmosférica y a 300 K se estimó en 0,026 W/(m K) según la bibliografía existente [108]. Este valor era significativamente más bajo que el de la pasta o el de las partículas de árido, que eran desconocidas. Por lo tanto, un aumento de V_a conlleva la disminución de la conductividad térmica del mortero resultante.

A medida que aumentó la proporción de árido en la mezcla se aumentó la proporción de agua/cemento necesaria, lo que implicó una disminución de la conductividad térmica de la pasta de cemento-superplastificante-agua, como ya comprobó Allan *et al.* [45] mediante el estudio de diferentes lechadas de cemento.

Por último, se debió obtener la conductividad térmica de las partículas de árido (λ_s), para la cual se desconoce la existencia de métodos que permitan su determinación directa. La mejor opción era asumir la conductividad térmica del material previo al machaqueo del mismo para la obtención del árido, lo cual no era posible para la EAE y el RCD debido a su proceso de obtención. En este caso, λ_s se estimó a partir de la medida de la conductividad térmica efectiva del árido saturado de agua ($\lambda_{\text{árido,sat}}$) y la medida de la porosidad accesible al agua del árido sin compactar (ϕ_s), cuyo procedimiento de obtención se ha explicado con anterioridad en el apartado 3.3.5.2. Para ello, se decidió emplear los modelos en serie (20), en paralelo de segundo grado (21) y el ponderado geométrico (22) propuestos por diversos autores [109,110] para la estimación de la conductividad térmica de las partículas de árido. La conductividad térmica del agua (λ_w) fue de 0,6 W/(m K) a 294 K según la bibliografía consultada [108].

$$\lambda_{\text{árido,sat}} = (1 - \phi_s) \cdot \lambda_s + \phi_s \cdot \lambda_w \quad (20)$$

$$\lambda_{\text{árido,sat}} = ((1 - \phi_s) \cdot (\lambda_s)^{0.5} + \phi_s \cdot (\lambda_w)^{0.5})^2 \quad (21)$$

$$\lambda_{\text{árido,sat}} = (\lambda_s)^{(1-\phi_s)} \cdot (\lambda_w)^{\phi_s} \quad (22)$$

La Tabla 17 muestra las conductividades térmicas estimadas en cada caso. Como se pudo apreciar, el valor de conductividad de cualquiera de las partículas de los áridos empleados fue superior al del mejor resultado obtenido en los morteros. Por lo tanto, el aumento de la proporción volumétrica del árido en la mezcla contribuyó al aumento de conductividad térmica del mortero resultante.

Tabla 17. Conductividades térmicas de las partículas de árido λ_s estimadas.

Árido (-)	ϕ_s (%)	$\lambda_{\text{árido,sat}}$ W/(m K)	Serie λ_s W/(m K)	Paralelo segundo grado λ_s W/(m K)	Ponderado geométrico λ_s W/(m K)
C	28	1,62	2,01	2,14	2,36
S	32	2,55	3,45	3,91	4,99
RCD	45	1,27	1,81	1,99	2,32
EAE	32	1,31	1,63	1,73	1,88

La Fig. 46 representa la evolución de las distribuciones volumétricas en función de la proporción de árido empleada, así como la proporción de agua respecto al cemento requerida en cada caso (w/c). Para todos los áridos estudiados, el aumento de V_s fue similar por lo que la contribución del árido a la mejora de la conductividad debería haber sido similar también. En el caso de los áridos C, EAE y S el aumento de w/c fue aproximadamente lineal e implicó un descenso de V_p , pero sin aumentar significativamente el volumen de aire V_a . Por lo tanto, la mejora de conductividad aportada por el árido compensó la pérdida de conductividad de la pasta debido a la mayor proporción w/c requerida por la mezcla.

Sin embargo, en el caso del RCD se observó cómo el w/c aumentó de manera exponencial. En el caso de la mortero RCD₃ se tuvo que emplear una gran proporción de agua en la mezcla, lo que conllevó una mayor disminución de la conductividad térmica de la pasta y un mayor aumento del contenido en aire V_a . Todo ello disminuyó la conductividad térmica del mortero resultante en mayor medida de lo que la pudo mejorar el árido.

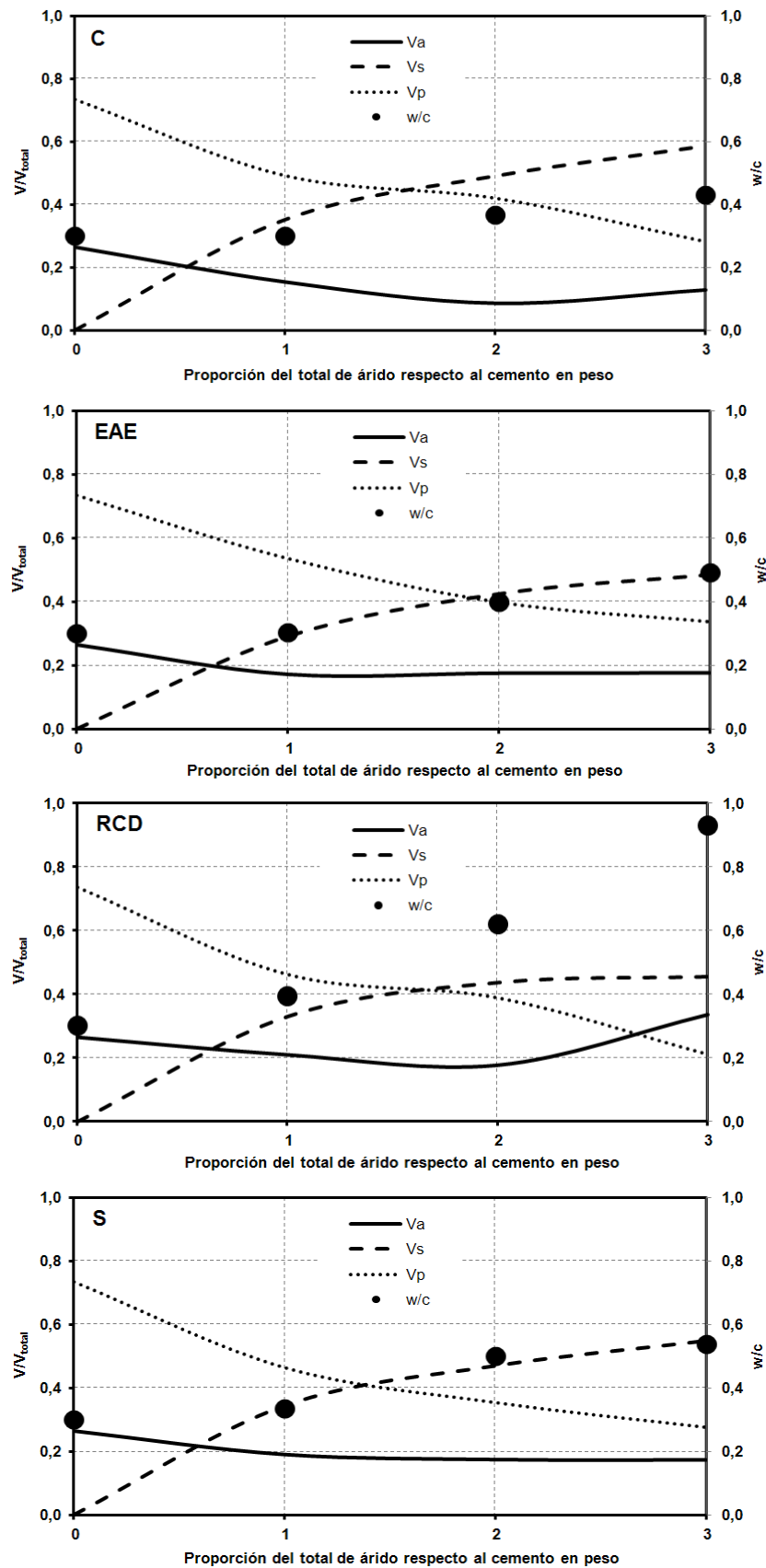


Fig. 46. Distribuciones volumétricas del mortero y proporción de agua empleada en su mezcla en función del tipo y proporción de árido.

3.6.2 DURABILIDAD DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO

3.6.2.1 Introducción

En este apartado se analizó la influencia de los ciclos térmicos de hielo y deshielo en los morteros geotérmicos considerados óptimos en el apartado 3.6.1, realizándose únicamente un único mortero por cada tipo de árido estudiado.

En primer lugar se analizó la influencia del cambio de amasadora en las propiedades físicas y resistentes del mortero. A continuación se analizó la influencia del contenido en agua, del tiempo de curado y de los ciclos de hielo-deshielo aplicados en las propiedades resistentes y en la conductividad térmica de los morteros geotérmicos evaluados.

Todos los resultados obtenidos se encuentran de manera resumida en el anexo de resultados A2.

3.6.2.2 Influencia del cambio de amasadora realizado

El uso en obra de la amasadora planetaria empleada en laboratorio (Fig. 36) no era común, por lo que se decidió cambiar a una amasadora de eje basculante. Por este motivo se volvió a determinar la cantidad de agua empleada en los 5 morteros seleccionados.

La Tabla 18 muestra la dosificación final de agua empleada, así como los resultados obtenidos tanto para las amasadas realizadas en el apartado anterior (3.4.1) como para las amasadas realizadas para el análisis de durabilidad (3.5.2).

Para la confección de la lechada se empleó el mismo procedimiento de amasado y la misma proporción de agua, resultando en una densidad aparente en seco y una resistencia a compresión similares al apartado anterior. Sin embargo, la porosidad de la mezcla antigua fue mayor a la actual, posiblemente por la mayor cantidad de aire ocluido durante el propio procedimiento de amasado.

El cambio de amasadora realizado para la fabricación de los morteros hizo que se requiriera una mayor cantidad de agua para los morteros con RCD, EAE y C, mientras que en el caso del mortero S se dio el caso contrario. Sin embargo, en los 4 morteros se incrementó ligeramente la porosidad accesible. Probablemente, el cambio de mecanismo de amasado existente entre amasadoras introdujo una mayor cantidad de aire. La amasadora de tambor basculante introdujo una mayor cantidad de aire a la mezcla ya que el mortero se despegaba del tambor en la parte superior y caía a la parte inferior. En el caso del mortero de RCD, el aumento de la porosidad fue notable,

si bien este mayor incremento también era posible que se debiera a la propia heterogeneidad que presentaba este árido. Por otra parte, se apreció una disminución de la compresión simple en todos los morteros, en especial en el caso de los áridos EAE y RCD, en los que la reducción fue del 27% y 22%, respectivamente. Esta reducción de la resistencia a compresión observada se debió al aumento de su porosidad, lo que concuerda con los resultados mostrados en el estudio realizado por Chen *et al.* [99].

Tabla 18. Resultados obtenidos para las dosificaciones empleadas en función de la amasadora empleada.

Relleno	Cantidad de agua/cemento (-)		Densidad aparente en seco (kg/m ³)		Porosidad accesible (%)		Compresión Simple (MPa)	
	Anterior	Actual	Anterior	Actual	Anterior	Actual	Anterior	Actual
L	0,3	0,3	1829	1846	0,27	0,21	67	66
RCD	0,63	0,66	1930	1770	0,18	0,26	41	32
EAE	0,41	0,42	2474	2419	0,17	0,19	74	54
C	0,37	0,39	2263	2206	0,09	0,12	75	70
S	0,47	0,43	2115	2092	0,13	0,15	61	61

Anterior: Resultados obtenidos para la misma dosificación con la amasadora horizontal planetaria
Actual: Resultados obtenidos para la amasadora de eje basculante actual

3.6.2.3 Resistencia mecánica

En primer lugar, se analizó la influencia del contenido de agua de todas las probetas fabricadas, independientemente del tipo de árido o tratamiento realizado, en las propiedades resistentes de los morteros evaluados. Como se puede apreciar en la Fig. 47, las fuerzas registradas mostraron una disminución general de la resistencia mecánica con el aumento del contenido volumétrico de agua de los morteros.

Chen *et al.* [99] realizaron un exhaustivo resumen de la relación existente entre la porosidad y las resistencias a flexión, compresión y tracción de morteros de cemento, concluyendo que las resistencias disminuían con la porosidad del mismo. Sin embargo, para modificar su porosidad, variaron únicamente la cantidad de agua empleada en la mezcla, a diferencia de este estudio, en el que se ha variado el tipo de árido. Debido a ello, la relación entre la resistencia a flexión y la porosidad presentó la misma tendencia general a la descrita por Chen *et al.* [99], aunque con una mayor dispersión propiciada por el cambio de áridos.

El comportamiento de la fuerza de adherencia difirió de las fuerzas de flexión y compresión simple. Los valores máximos de adherencia mostraron la misma tendencia descendente con el aumento del contenido volumétrico de agua del mortero, posiblemente por el efecto lubricante del agua en la superficie de contacto entre el mortero y el tubo. Sin embargo, la fuerza mínima de adherencia registrada pareció

independiente del contenido volumétrico de agua, por lo que en estos casos el despegue se pudo haber producido debido a defectos en la superficie de contacto entre el tubo y el mortero.

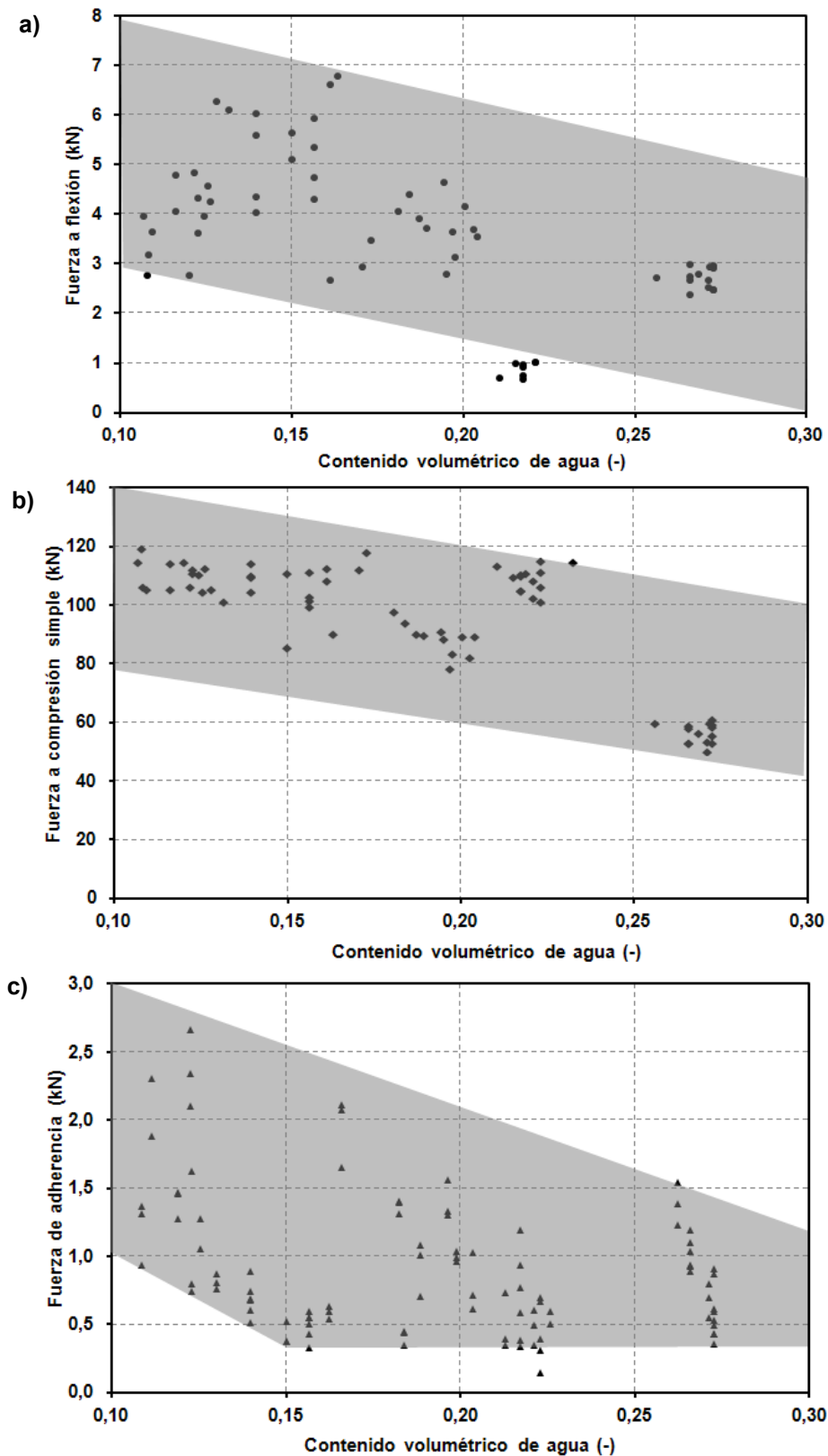


Fig. 47. Resistencia mecánica de los morteros en función de su contenido volumétrico de agua: a) fuerza a flexión, b) fuerza a compresión simple y c) fuerza de adherencia.

Por otra parte, se constató que las propiedades resistentes internas del mortero (resistencia a flexión y compresión simple) no influyeron de manera significativa en la resistencia de adherencia medida, como pudo verse en la Fig. 48. Por lo tanto, la resistencia de adherencia vino determinada por las características de la superficie de contacto entre ambos, influyendo negativamente el contenido volumétrico de agua del mortero.

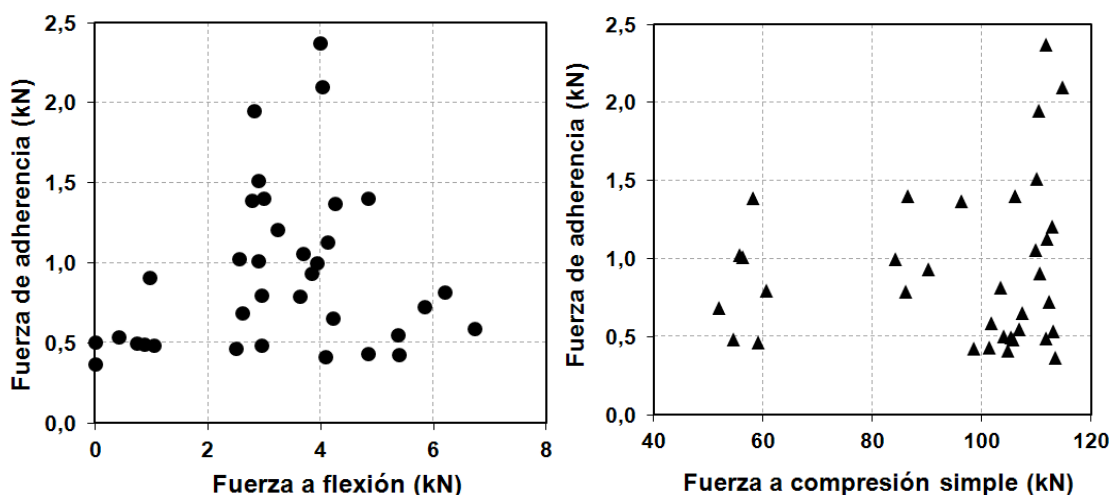


Fig. 48. Relación entre las propiedades resistentes del mortero y la fuerza de adherencia de la sonda al mortero.

En vista de la influencia negativa detectada del contenido volumétrico de agua sobre las propiedades resistentes del mortero, se analizaron sus posibles causas. Para ello, se determinó el contenido volumétrico de agua en función del tipo de mortero y el tratamiento realizado (inmersión continua en agua o ciclos de hielo-deshielo), cuyos resultados se muestran en la Fig. 49.

Lo primero que se apreció es que el contenido volumétrico de agua final del mortero dependía en mayor medida del tipo de árido empleado en el mortero que del tratamiento realizado. Por otra parte, la inmersión en agua continua disminuyó el contenido volumétrico de agua en todos los morteros, lo que concuerda con la reducción de la capacidad filtrante observada por Allan *et al.* [42]. Por último, al comparar los contenidos volumétricos de agua de las probetas sometidas a un curado continuo en agua con las sometidas a ciclos sucesivos de hielo-deshielo, se pudo concluir que los ciclos de hielo-deshielo aumentaban el contenido de agua en todos los casos, probablemente debido a los cambios de presiones a las que se sometieron las probetas por la alternancia de exposiciones (expuestas a la presión de aire del congelador durante el hielo y sumergidas en agua durante el deshielo). Este fenómeno puede resultar determinante en el tramo de intercambiador donde el relleno se encuentre por encima e incluso dentro del rango de variación del nivel freático (Fig. 38), ya que su contenido en agua puede ser mayor que el relleno que se

encuentre inmediatamente debajo del nivel freático, que está sometido a una presión de agua más constante (Fig. 38).

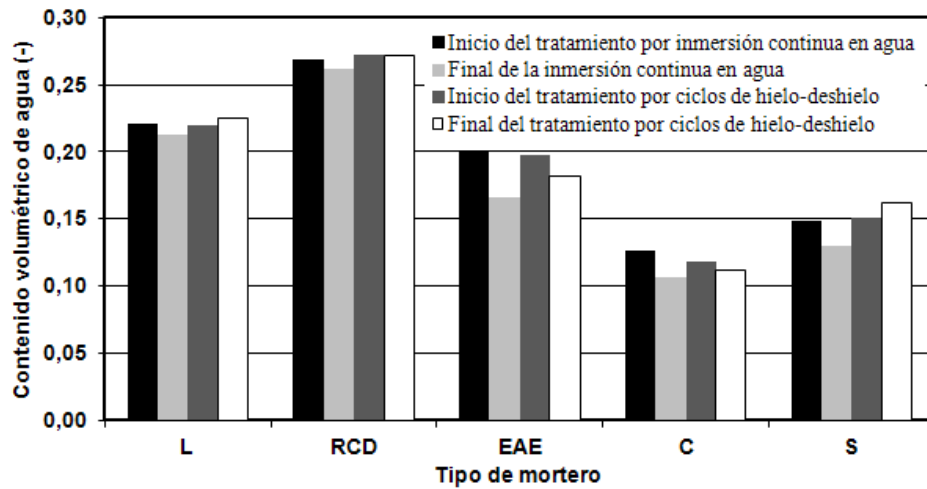


Fig. 49. Contenido volumétrico de agua de los morteros a lo largo de los ciclos realizados.

Además, como se puede apreciar en la Fig. 50, los morteros C, EAE, RCD y S presentaron una clara correlación entre la cantidad de agua empleada en la fabricación de los morteros y su contenido volumétrico de agua final, lo que indicó que el contenido volumétrico de agua de la probeta no se debía a la saturación por inmersión realizada, sino a la cantidad de agua requerida por cada mortero para alcanzar la consistencia deseada. Esto indicó que las probetas habían sufrido una impermeabilización superficial indeseada, probablemente debido al aceite mineral empleado en los moldes para facilitar su desmolde. Por consiguiente, se intuyó que las probetas no se encontraban saturadas en su interior.

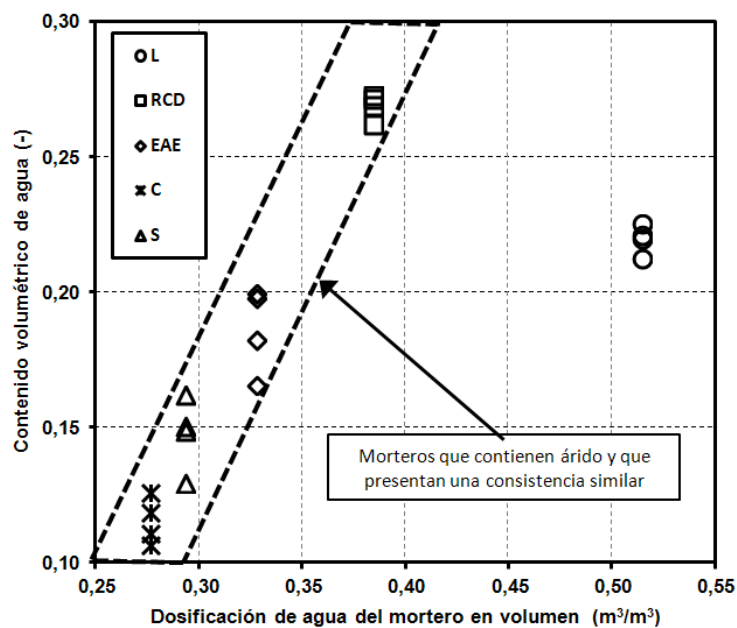


Fig. 50. Relación entre la dosificación de agua empleada y el contenido volumétrico de agua final de los morteros C, EAE, RCD y S.

Una vez demostrado que la influencia del tipo de mortero (y por consiguiente del tipo de árido) en su contenido volumétrico de agua fue mayor a la del tipo de tratamiento aplicado - curado continuo en agua o ciclos de hielo deshielo -, se realizó el análisis de los morteros por separado.

En primer lugar, se analizó si los cambios del contenido volumétrico de agua observados para cada mortero repercutieron en su resistencia mecánica. Para ello, se representaron las fuerzas de flexión, compresión simple y de adherencia en función del tipo y del tiempo de tratamiento aplicado (Fig. 51). Cada valor de fuerza de flexión mostrado se obtuvo a partir de la media de dos probetas ensayadas. La fuerza a compresión simple se obtuvo del promedio del resultado de ensayar las cuatro mitades de probeta generadas durante el ensayo de flexión. Por último, cada resultado de fuerza de adherencia mostrado corresponde a la media de tres ensayos realizados, salvo en el caso del mortero L, en el que dos probetas sometidas al daño de hielo-deshielo rompieron a los 4 y 7 ciclos. Las líneas horizontales representan el valor de referencia obtenido a los 28 días de curado para cada tipo de mortero evaluado. Se decidió no tener en consideración el valor de referencia de la fuerza de adherencia del mortero C ya que por error el ensayo se realizó a 20°C en vez de a 15°C, al asumirse que el valor medido era significativamente mayor al esperado por la clara influencia de la temperatura que presenta este ensayo [42].

La variación del comportamiento mecánico de los morteros evaluados debido a los tratamientos realizados no resultó igual en todos los casos. Salvo en el caso del mortero L que se analizó en un apartado posterior, las fuerzas de flexión (Fig. 51a) y compresión simple (Fig. 51b) no presentaron ninguna relación ni con el tiempo de inmersión de las probetas, ni con el daño por hielo-deshielo realizado, probablemente por no encontrarse saturadas las probetas, como indicaba la norma ASTM C666/C666 M-03.

Para su comprobación, se analizaron los resultados obtenidos de flexión y de compresión simple para cada mortero fabricado, sin tener en cuenta el tratamiento realizado. La Fig. 52 muestra la gráfica de probabilidad-probabilidad de la distribución normal para los resultados de flexión y compresión simple obtenidos para el mortero RCD. Al igual que en los morteros de EAE, RCD y C los resultados se ajustaron a una distribución normal con un coeficiente de correlación al cuadrado superior en ambos casos a 0,90, por lo que se confirmó que la variación observada de los resultados de compresión y flexión se debía únicamente a la propia incertidumbre del ensayo realizado.

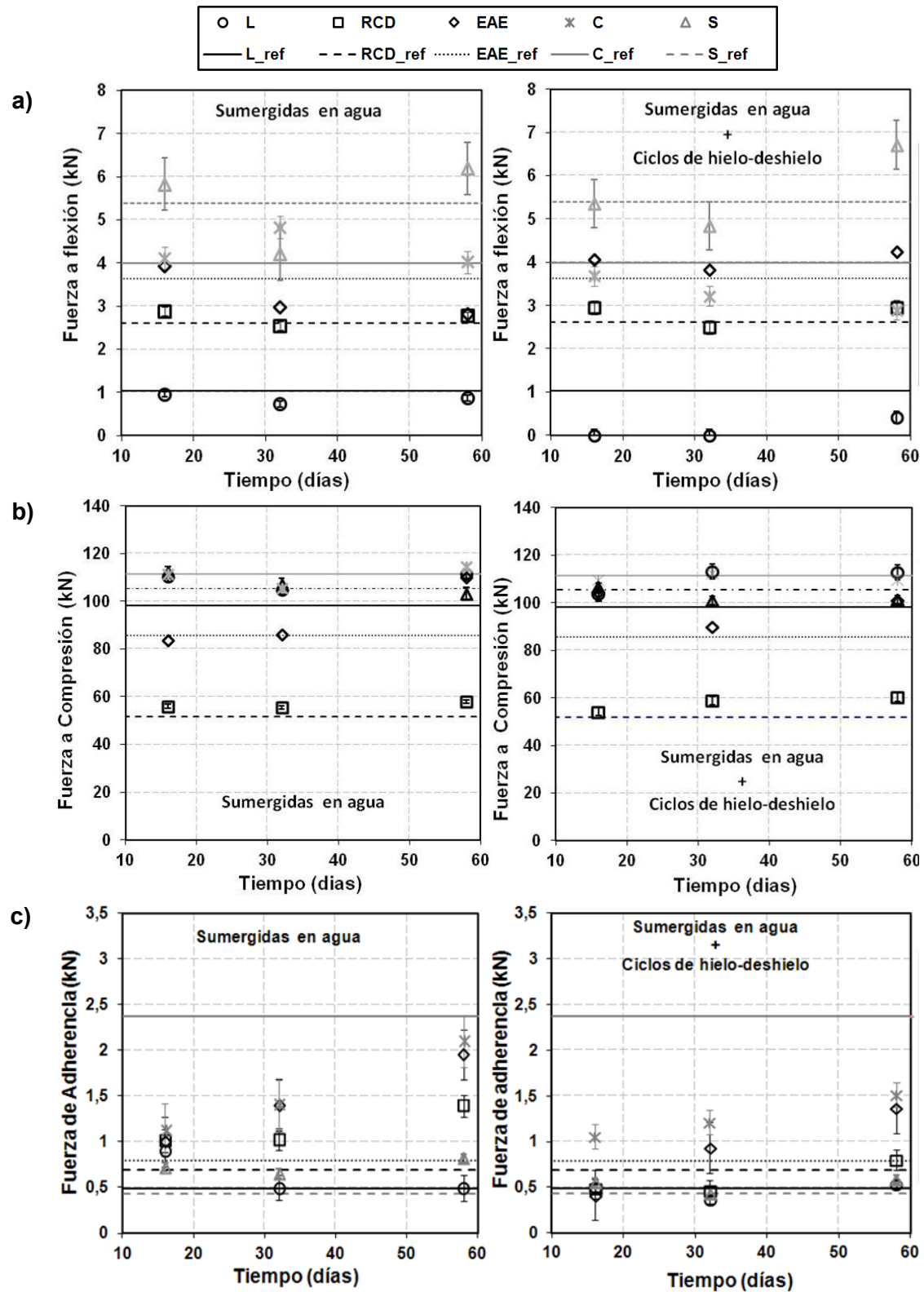


Fig. 51. Fuerzas de a) flexión, b) de compresión simple y c) de adherencia entre el relleno y el tubo de PEAD de los morteros sumergidos en agua y/o sometidos a ciclos de hielo-deshielo.

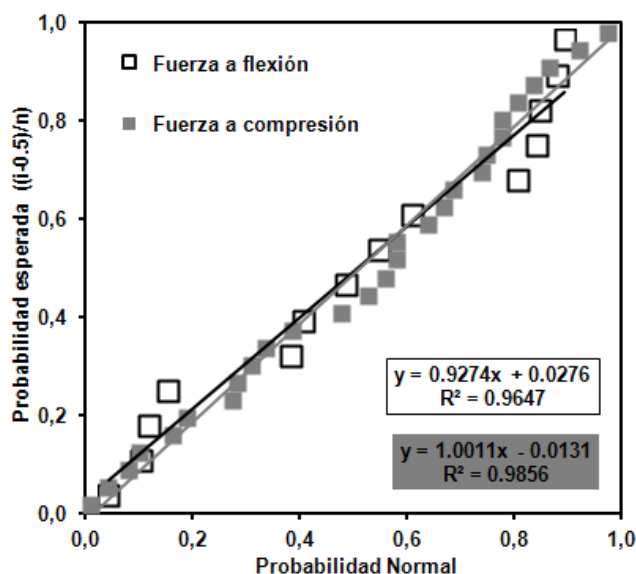


Fig. 52. Gráfico de probabilidad-probabilidad normal de la fuerza a flexión y compresión simple para el mortero RCD.

En el caso de la fuerza de adherencia (Fig. 51c), se intuyó una mejoría con el tiempo de curado en sumergido de los morteros de RCD, EAE y C, lo que se atribuyó a la disminución del contenido volumétrico de agua de estos morteros respecto al inicial determinado a los 28 días de curado (Fig. 49). Sin embargo, la mejora de la adherencia apreciada en las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo fue menor dado que también se redujo en menor grado el contenido volumétrico de agua de los morteros. A medida que aumentó la fuerza de despegue aplicada, se fueron produciendo sucesivas micro-roturas en la superficie de contacto entre el tubo y el mortero, hasta que se alcanzara el nivel mínimo de energía necesario para despegar la sonda del mortero que la sustentaba. Por lo tanto, el daño final registrado por este ensayo fue el resultado de un daño acumulado en toda la superficie, por lo que el ensayo de adherencia se ajustó a la función de distribución probabilística de *Weibull*, como ya demostraron previamente numerosos autores en otros materiales [111-114]. Es por ello que para comprobar la influencia del tratamiento realizado en la fuerza de adherencia obtenida para cada mortero por separado se ajustaron los resultados obtenidos a esta distribución, como muestra el caso del mortero RCD en la gráfica de probabilidad-probabilidad de la Fig. 53. El coeficiente de correlación en todos los casos fue mayor a 0,95, por lo que no se pudo confirmar que el aumento de adherencia observado fuera debido al tratamiento realizado.

Al haberse demostrado que para los morteros que contienen árido los tratamientos realizados no habían ejercido ninguna influencia significativa, a partir de este punto se trataron todos los ensayos realizados en cada mortero como variables explicativas de un único estado de ese mortero. La Tabla 19 muestra los intervalos de confianza del 95% de las fuerzas a flexión calculados para cada mortero con el fin de determinar si las diferencias entre los diferentes morteros resultaban significativas. Lo primero que

se concluyó es que cualquiera de los áridos empleados mejoró de manera significativa la resistencia a flexión del mortero. De todos los áridos evaluados, el RCD fue el que menor resistencia presenta, si bien resultó ser suficiente para soportar el daño realizado por los ciclos de hielo-deshielo. Por otra parte, los áridos C y EAE se comportaron de una forma similar, lo que concuerda con los estudios realizados por Masleudin *et al.* [115] sobre hormigones.

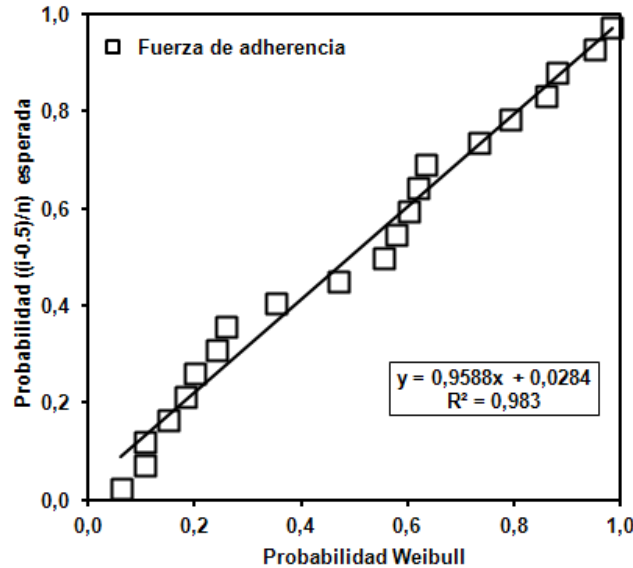


Fig. 53. Gráfica de probabilidad-probabilidad *Weibull* de la fuerza de adherencia para el mortero RCD.

Tabla 19. Parámetros de la distribución normal de los ensayos a flexión realizados para cada mortero.

Parámetros	Mortero					
	L*	RCD	EAE	C	S	
$\bar{x}$	890	2746	3644	3823	5504	
$\hat{s}$	140	203	592	749	875	
$P(x_1 \leq x \leq x_2) = 0.95$	x_1	799	2629	3334	3390	4999
	x_2	981	2863	3954	4255	6009

* Resultados de las probetas sumergidas en agua

* Resultados de las probetas sumergidas en agua

De todos los rellenos analizados, el único que sufrió un deterioro visible de sus resistencias mecánicas debido a la aplicación de los ciclos de hielo-deshielo fue el de lechada, L. De todas las probetas sometidas al daño por hielo-deshielo, solamente se pudieron ensayar el 17% y el 78% de las probetas de flexión y adherencia, respectivamente. En el caso de ensayo a flexión, se consideró que la fuerza de flexión del ensayo era nula. En el caso de los ensayos de adherencia, la probeta se tuvo que descartar. La Fig. 54 muestra imágenes del estado de las probetas 7 y 8 (sometidas únicamente a la inmersión en agua), las probetas 9 y 10 (sometidas al daño por hielo-deshielo) y la rotura observada en una de las probetas de adherencia deterioradas. En ellas se apreció claramente el daño realizado por los ciclos de hielo deshielo. El aspecto de las probetas 7 y 8 era similar al inicial observado a los 28 días. Sin embargo, las probetas 9 y 10 sufrieron daños severos cuando se alcanzaron los 24

ciclos de hielo-deshielo. De forma similar, las probetas de adherencia rompieron a los 4 y 7 ciclos, respectivamente, debido probablemente a una coquera que se sospechó provocó la rotura de la probeta. Al sumergir las probetas en agua, se generó un gradiente térmico entre la sonda (en contacto directo con el agua) y la superficie de mortero con la que estaba en contacto y que se encontraba a menor temperatura (-15°C). Como el coeficiente de dilatación térmica del mortero era menor al del PEAD [108], se creó un confinamiento del tubo que generó esfuerzos de tracción en el mortero, lo que propagó las grietas de un tamaño crítico presentes en la probeta debido a las coqueras de la misma.

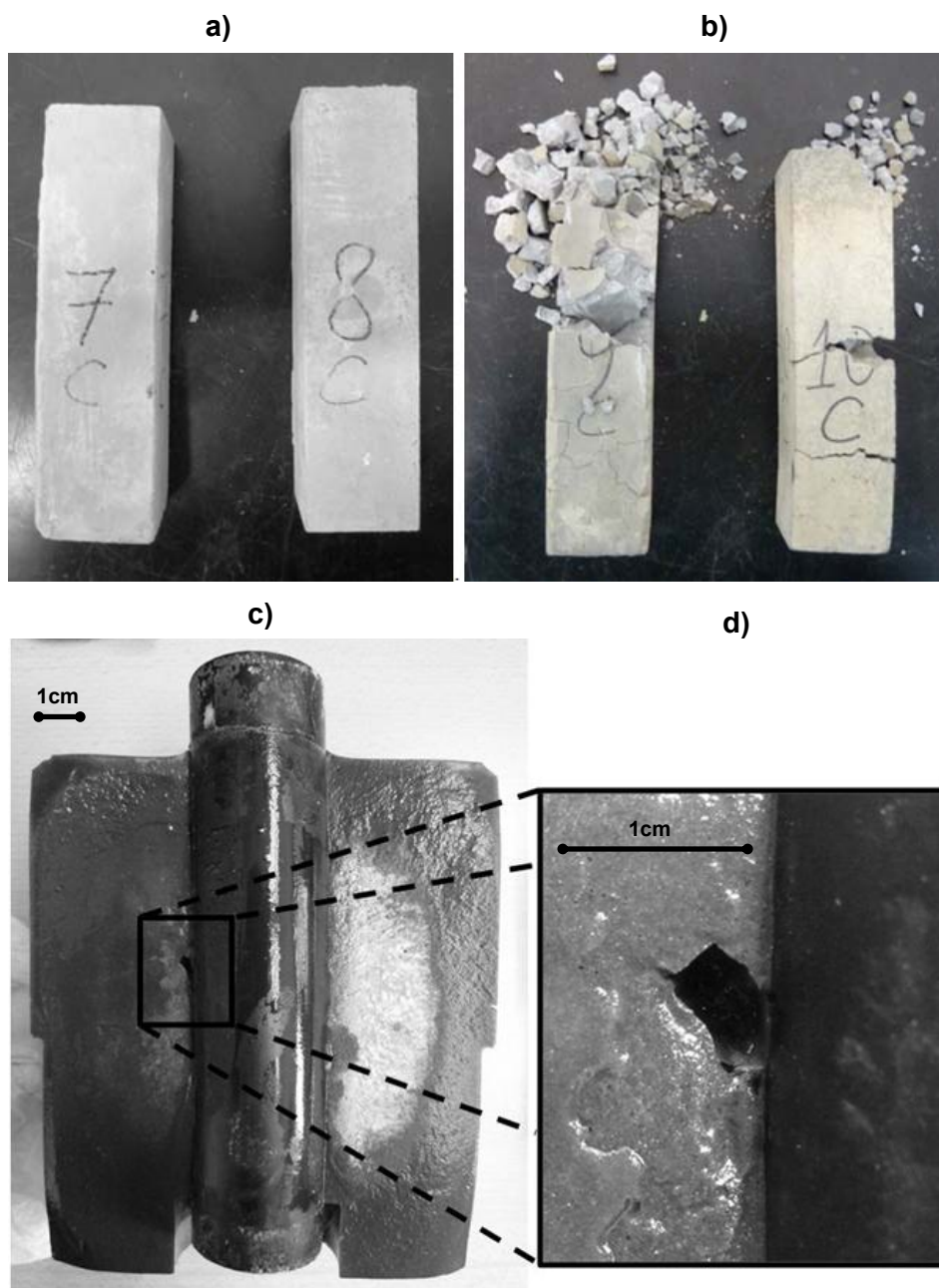


Fig. 54. Situación de las probetas de lechada al final del ciclo de hielo nº 24 a) probetas de flexión sumergidas en agua, b) probetas de flexión sometidas al daño por hielo-deshielo, c) probeta de adherencia rota debido a los ciclos de hielo-deshielo y d) detalle de la causa de su ruptura.

3.6.2.4 Conductividad térmica aparente

En primer lugar, al igual que en el caso de las resistencias mecánicas, se evaluó la influencia del contenido volumétrico de agua en la conductividad térmica del relleno sin realizar distinción alguna entre los diferentes morteros analizados (Fig. 55). Para ello, la conductividad térmica se evaluó con las probetas sumergidas en agua pero dejando la cara superior al descubierto para evitar que el calor aportado durante el ensayo se disipara directamente al agua.

A diferencia de las propiedades mecánicas, no se pudo definir una clara influencia del contenido en agua de la probeta, ya que como se comentó en el apartado anterior, el agua que contenían las probetas provenía del agua de amasado empleada y por lo tanto, las probetas no estaban saturadas. Se intuyó que el contenido en agua de las probetas no compensaba la influencia que tenía el tipo de árido empleado, cuya influencia se muestra en el apartado 3.6.1.5.

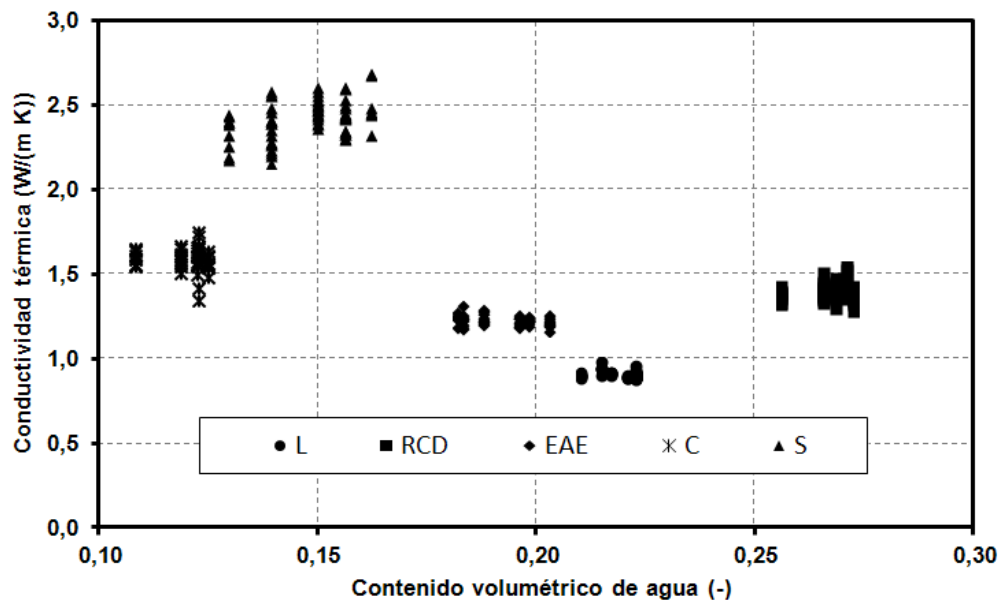


Fig. 55. Relación entre el contenido volumétrico y la conductividad térmica medida.

La Fig. 56 muestra los resultados de conductividad térmica obtenidos en función del tipo y del tiempo de tratamiento realizado. La conductividad térmica del mortero se determina a partir de un ensayo transitorio en el que se determina la evolución de la temperatura en función del tiempo transcurrido. Por lo tanto, la medida de conductividad térmica depende del intervalo de tiempo de ensayo escogido, cuya distribución se ajusta según una distribución de probabilidad *Lognormal*. La Fig. 57 muestra como ejemplo la gráfica de *probabilidad-probabilidad Lognormal* obtenida para el mortero S. Al igual que el mortero S, el resto de morteros también se ajustó a la distribución *Lognormal*, con coeficientes de correlación al cuadrado superiores a 0,95. Se concluyó entonces que la conductividad no estaba influenciada ni por el

tiempo de curado ni por los ciclos térmicos realizados, por mucho que las probetas sufrieron daños severos durante el proceso (Fig. 58).

Por todo ello, se pudo concluir que la conductividad térmica del relleno no disminuía siempre y cuando la estructura interna del mortero no se fracturara, por lo que el aumento de resistencia térmica del intercambiador geotérmico asociado a las pérdidas de prestaciones del relleno venía determinado bien por la aparición de resistencias térmicas de contacto adicionales en las grietas originadas o por el aumento de la resistencia de contacto entre la sonda y el relleno.

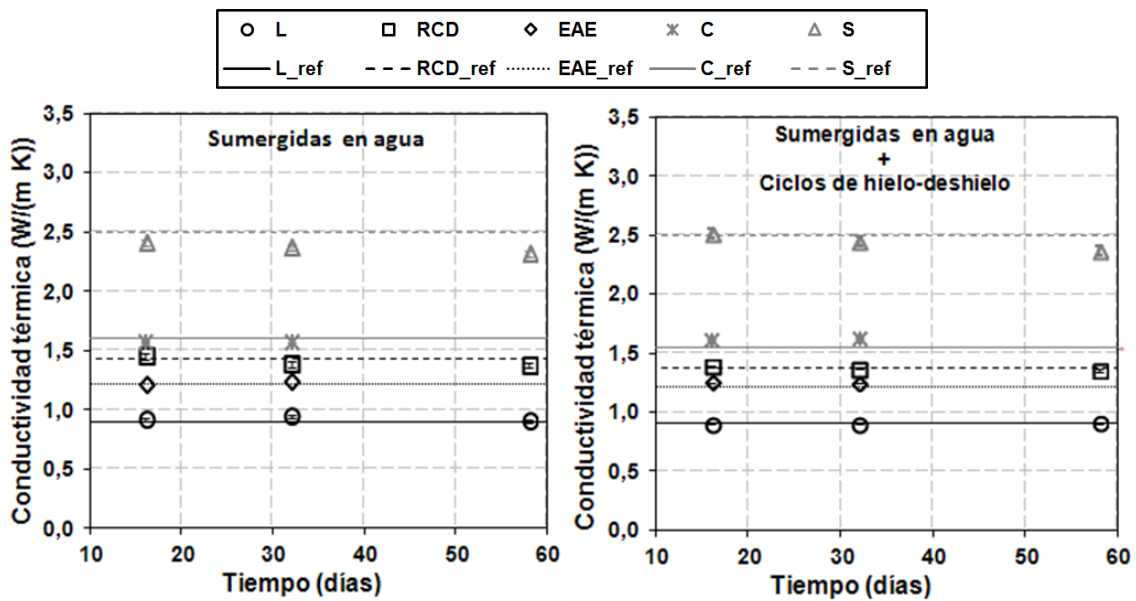


Fig. 56. Conductividad térmica de los morteros sumergidos en agua y/o sometidos a ciclos de hielo-deshielo.

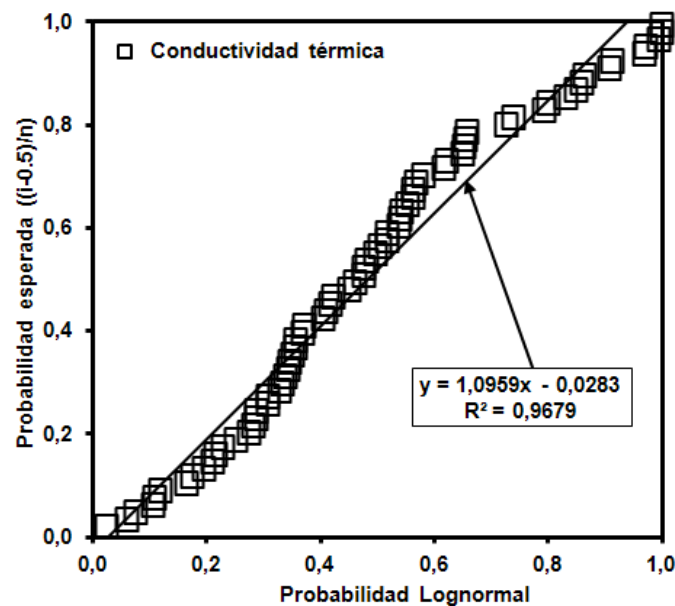


Fig. 57. Gráfica de probabilidad-probabilidad Lognormal de conductividad térmica para el mortero RCD.

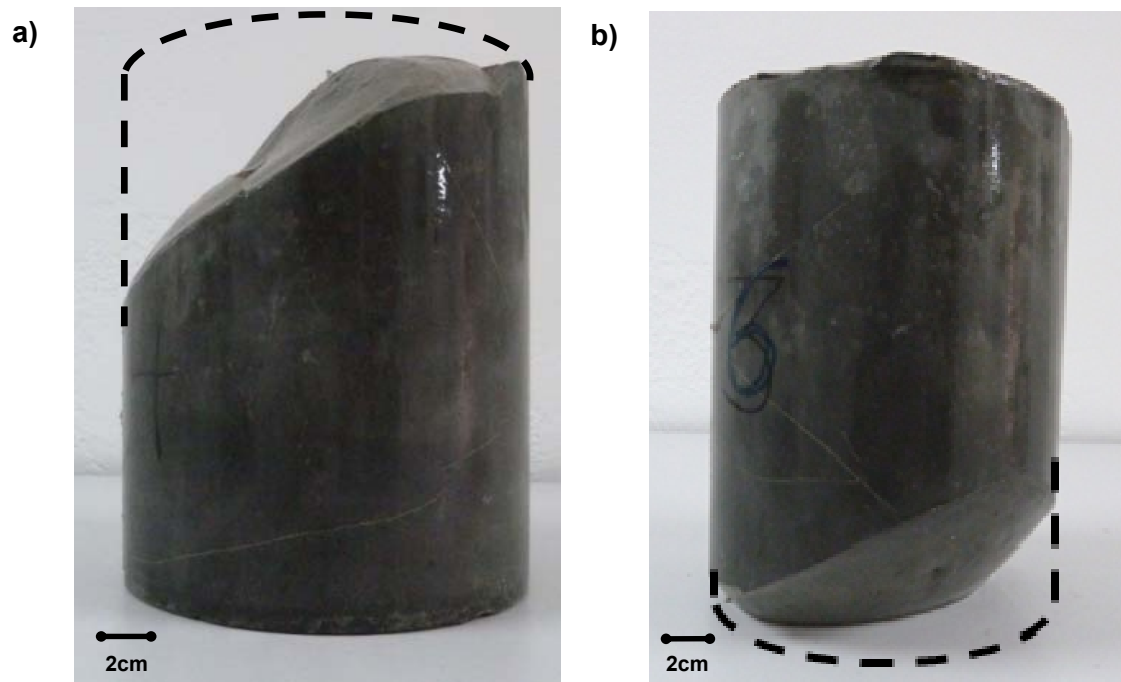


Fig. 58. Estado de las probetas del mortero L a los 14 ciclos de hielo-deshielo: a) probeta 4 y b) probeta 6.

3.6.3 APLICACIÓN DE LOS RELLENOS ANALIZADOS

Durante las dos fases en las que se dividió la caracterización en laboratorio de los morteros geotérmicos, se definieron sus propiedades físicas, térmicas y resistentes, a partir de las cuales se pudo determinar el ámbito dentro del cual podían ser de aplicación. La Tabla 20 muestra, de manera cualitativa, las propiedades medidas en cada relleno, y su posible aplicación. Los niveles se determinaron por comparación directa entre los resultados obtenidos en laboratorio, por lo que no representan valores absolutos comparables a los obtenidos en otros estudios.

Dadas las propiedades térmicas y resistentes observadas en la lechada de cemento, no se recomienda en ningún caso su uso.

El comportamiento de los morteros de árido calizo y silíceo fue similar en todos los casos, salvo por su conductividad térmica, que era ligeramente menor en el árido calizo, siendo una alternativa al silíceo siempre y cuando la conductividad térmica del terreno no sea muy elevada (valores superiores a 3-4 W/(m K)). Por otra parte, la resistencia a flexión observada en los morteros de ambos áridos, junto a su alta resistencia a compresión indicaron su posible uso como relleno geotérmico en instalaciones que se encuentren debajo del propio edificio en los que la instalación geotérmica esté sometida a esfuerzos adicionales. Con un estudio con mayor detalle de las propiedades resistentes y de durabilidad de los morteros se podrían incluso utilizar para pilotes activados térmicamente.

Tabla 20. Clasificación cualitativa de los rellenos evaluados.

Relleno	C	EAE+F	RCD+F	S
Sensibilidad de la cantidad de agua requerida	Media/alta	Alta	Baja	Media
Porosidad	Baja	Media	Alta	Media
Resistencia a compresión	Alta	Alta	Media/baja	Alta
Resistencia a flexión	Media	Media	Media/baja	Alta
Resistencia de adherencia	Alta	Media/alta	Media	Baja
Conductividad térmica	Media/alta	Media/baja	Media/baja	Alta

Si bien el mortero de EAE presentó unas propiedades resistentes similares al mortero calizo, no se recomienda su uso generalizado en ningún caso debido a la contaminación debido a los lixiviados del mortero resultante, y a que su conductividad térmica no mejoró la de los áridos naturales analizados. Además presentó problemas significativos de segregación y una gran sensibilidad de la consistencia de la mezcla con ligeras variaciones del agua de amasado empleada.

Por último, el mortero realizado a base de RCD presentó una resistencia menor al resto de morteros evaluados, por lo que no se recomienda su uso bajo cimentaciones sometidas a grandes cargas. Sin embargo, la conductividad térmica en saturado de las mezclas se acercó al rango de valores recomendado por Fernández *et al.* [8] o Lee *et al.* [31]. Además, el mortero de RCD presentó menor sensibilidad en la consistencia en estado fresco por variaciones en el contenido de agua de la mezcla, una segregación menor al resto de áridos evaluados y una alta porosidad que indican su potencial de uso en terrenos en los que la conductividad térmica sea relativamente baja (1-2 W/(m K)) y haya agua subterránea.

CAPÍTULO 4. INFLUENCIA DEL RELLENO EN LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza la influencia del tipo de relleno empleado en la eficiencia de un intercambiador geotérmico vertical de lazo cerrado. Como parte del proyecto de investigación en el que se enmarca esta tesis, se encontraba la construcción de una instalación piloto que contara con intercambiadores geotérmicos en los que se emplearan los rellenos analizados en laboratorio. El objetivo era analizar el comportamiento de los rellenos a corto plazo mediante la realización de TRTs y detectar su posible deterioro a largo plazo a partir de la monitorización posterior de los intercambiadores, que formarían parte de una instalación destinada a climatización de edificios.

La instalación piloto se construyó en el *Parque tecnológico de Boecillo*, Valladolid. El dimensionamiento de la instalación se realizó en base al conocimiento previo de las propiedades térmicas del terreno, resultando en una conductividad térmica del terreno estimada en ese caso en $2,5 \text{ W/(m K)}$.

La Fig. 59 muestra un esquema de la disposición en planta del sistema geotérmico construido. Consta de 12 intercambiadores de calor de 120 mm de diámetro y 98 m de profundidad cuya disposición en planta tiene forma de T y cuyo objetivo es suministrar al edificio una potencia térmica de 133 kW en modo calefacción y 98,8 kW en modo refrigeración. La demanda de calor y frío estimada para el edificio fue de 165 MWh/año y 115,83 MWh/año, respectivamente.

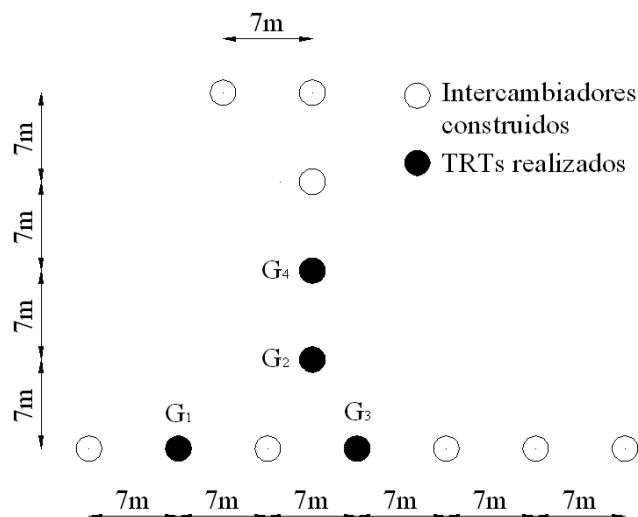


Fig. 59. Disposición en planta de los TRTs realizados.

Para el dimensionamiento de la instalación no se tuvo en cuenta la presencia de los diferentes rellenos empleados en esta tesis por lo que fue necesario establecer una conductividad térmica única del relleno de $1,2 \text{ W/(m K)}$. La conductividad térmica del relleno asumida para el dimensionamiento es en todo caso inferior a cualquiera de los rellenos evaluados en el capítulo 3.3, por lo que el empleo de cualquiera de los rellenos propuestos no supondrá ningún problema para el correcto funcionamiento de la instalación.

De todos los rellenos analizados en laboratorio, se planificó la inyección de cuatro rellenos diferentes – uno por cada tipo de árido empleado en laboratorio - para determinar su influencia en la eficiencia de un intercambiador geotérmico. Para ello, se planificó la inyección de cada relleno en 3 perforaciones de características similares.

Las sondas en las que se ejecutaron los TRTs son las que se muestran en la Fig. 59 en color negro, y se identificarán de aquí en adelante como ensayos G_1 , G_2 , G_3 y G_4 .

Para completar la caracterización de la instalación geotérmica se recogieron muestras de los rellenos inyectados que posteriormente fueron analizadas en laboratorio. Finalmente, se fabricaron en laboratorio probetas de todos los morteros inyectados para determinar la influencia del procedimiento de amasado empleado en obra en las propiedades térmicas del relleno.

4.2 RELLENOS GEOTÉRMICOS EMPLEADOS

4.2.1 MATERIALES EMPLEADOS

4.2.1.1 Cemento

El cemento utilizado en obra fue un cemento CEMI 42.5 N-SR. Las propiedades del cemento facilitadas por CEMEX se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Características generales del cemento empleado.

Componentes	
Clinker	95-100 %
Componentes minoritarios	0-5 %
Características físicas	
Inicio de fraguado	≥ 60 minutos
Expansión Le Chatelier	≤ 10 mm
Resistencia a Compresión	
2 Días	≥ 10 MPa
28 Días	$42,5 \leq X \leq 62,5$ MPa
Características químicas	
Pérdida por calcinación	≤ 5 %
Residuo insoluble	≤ 5 %
Anhídrido sulfúrico (SO_3)	$\leq 3,5$ %
Cloruros	$\leq 0,1$ %

4.2.1.2 Bentonita

La bentonita (b) empleada fue proporcionada por la empresa COPSA S.A. Se trata de una bentonita mejorada para su uso en geotermia. Cuenta con un alto contenido en montmorillonita que aumenta su capacidad expansiva y disminuye la retracción debido al contacto con agua marina, como recomiendan los estudios realizados por Lee *et al.* [31].

4.2.1.3 Áridos

4.2.1.3.1 Arena silíceo

La arena silíceo fue la misma que la empleada en laboratorio, cuyas propiedades se encuentran resumidas en el apartado 3.2.2.2.

4.2.1.3.2 Escoria de acería Linz Donawitz

La escoria de acería *Linz Donawitz* (LD) es un subproducto obtenido durante el afinado del arrabio en el alto horno, en el que para la obtención de acero se eliminan la práctica totalidad de las impurezas del mismo a partir de la inyección de oxígeno. En esta tesis, se empleó escoria LD procedente de la fábrica de *Arcelor España*, localizada en Gijón.

A diferencia de la EAE, los lixiviados de las escoria LD no representaban una amenaza al medioambiente, ya que según la ficha técnica facilitada por el *CEDEX* [115] y al análisis químico facilitado por la empresa, el árido no contenía metales pesados que pudieran contaminar el acuífero presente en obra (Tabla 22).

Tabla 22. Composición química de la escoria de acería LD empleada.

Composición	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	S total	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	C
% Peso	34,69	13,16	40,92	8,48	0,27	0,78	0,26	0,35	0,39	0,41	0,04

La escoria empleada se muestra en la Fig. 60. Se trata de una escoria diferente a la inicialmente propuesta. La granulometría obtenida en laboratorio en base a la norma UNE-EN 933-1:1998/A1:2006 se muestra en la Tabla 23.

La granulometría difirió significativamente de la escoria de arco eléctrico usada en los ensayos de laboratorio. La escoria de acería LD presentó una densidad aparente de partículas y una absorción de agua de 3,47 g/cm³ y 1,4%, respectivamente, medidas de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. Estos valores fueron, en ambos casos, menores a los estimados para la EAE. En cuanto a la absorción, la norma UNE-EN 12620:2003+A1:2006 y la *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08* limitaban su valor al 5%, límite muy superior al experimentado en este caso.

Tabla 23. Granulometría de la escoria LD empleada en obra.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0,0	100,0
2	0	0,0	100,0
1	1,15	0,1	99,9
0,5	1054,2	92,5	7,5
0,25	1124,8	98,7	1,3
0,125	1130,7	99,2	0,8
0,063	1132,7	99,3	0,7



Fig. 60. Arena de escoria *Linz-Donawitz* de granulometría 0/1 mm empleada en laboratorio (escala en cm).

4.2.1.3.3 Residuos de Construcción y Demolición

La distancia existente entre la planta suministradora del material (ubicada en Madrid) y la cribadora ubicada en Asturias empleada para reducir el tamaño máximo de árido a 2 mm hizo inviable la utilización del RCD inicialmente propuesto, por lo que se sustituyó por un árido similar producido por la empresa *Parque Verde* situada en Asturias. La Tabla 24 muestra la granulometría del nuevo RCD, muy similar al escogido para los ensayos en laboratorio. La Fig. 61 muestra el RCD empleado.

La granulometría cumplió con el límite de finos permitido por la norma UNE-EN 13139:2003. La arena de RCD presentó una densidad aparente de sus partículas y una absorción de agua de $2,58 \text{ g/cm}^3$ y 4,85%, respectivamente, medidas de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006 y similares al RCD empleado en laboratorio. Dadas las similares características del RCD empleado en obra, se decidió mantener el uso de un 10% de filler calizo en peso para la mejora de calidad de sus finos.



Fig. 61. Arena de RCD empleado en obra de granulometría 0/2 mm (escala en cm).

Tabla 24. Granulometría del RCD empleado en obra.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0,25	0,0	100,0
2	69,1	7,4	92,6
1	314,7	33,8	66,2
0,5	512	55,0	45,0
0,25	667,4	71,7	28,3
0,125	778,15	83,6	16,4
0,063	835,15	89,8	10,2

4.2.1.4 Aditivos

El superplastificante (sp) utilizado fue el mismo al empleado en laboratorio, cuyas propiedades ya han sido expuestas en el apartado 3.2.3.

Debido al efecto secundario del superplastificante, en las amasadas realizadas en laboratorio se observó una reducción de la trabajabilidad significativa en el momento en el que se dejaba el mortero de relleno en reposo, en especial en el caso de la escoria de horno de arco eléctrico. Por ello, y como prevención de los posibles problemas que se pudieran presentar durante el bombeo e inyección del mortero, se optó por añadir un retardante de fraguado (r).

El retardante escogido fue el *Rheomix 925* de *BASF*, cuya ficha técnica se muestra en la Tabla 25. Se trata de un aditivo líquido que debe ser agregado al agua de amasado previamente a su mezcla con los demás componentes del mortero. Este producto aumenta el tiempo de trabajabilidad de la mezcla, permitiendo retrasar hasta 72 horas el inicio de fraguado. En este caso se estableció un tiempo abierto para bombeo de 12 horas para lo cual se empleó una dosificación del producto del 1% en peso respecto al cemento, según recomendación del fabricante.

Tabla 25. Propiedades del retardante de fraguado empleado.

Función principal	Retardante de fraguado para mortero.
Efecto secundario	Excesivo retraso de fraguado por sobredosificación.
Aspecto físico	Líquido azulado translúcido.
Densidad, 20°C	1,170 ± 0,03 gr/cm ³
pH, 20°C	8 ± 1
Cloruros	< 0,1%
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm	< 30 cps.

4.2.2 DOSIFICACIONES EMPLEADAS

En un principio se propusieron las mismas dosificaciones a las empleadas en el apartado 3.5.2. Sin embargo, se tuvieron que acometer diversos cambios debido a las diferentes características de los áridos disponibles en la obra. La Tabla 26 muestra las dosificaciones finalmente empleadas para cada uno de los rellenos propuestos para su inyección en obra.

Tabla 26. Dosificaciones finales empleadas en obra.

Relleno	C	s ₁	s ₂	s ₁ /c	s ₂ /c	b/c	sp/c	r/c	w/c
G ₁	*	Grafito	Silíceo	*	*	*	*	0	0,55**
G ₂	1	RCD	Filler	1,8	0,2	0,04	0,02	0,01	0,63
G ₃	1	Silíceo	0	2	0	0,04	0,02	0,01	0,57
G ₄	1	Escoria LD	Filler	1,25	0,75	0,04	0,02	0,01	0,625
b	Bentonita								
r	Retardante de fraguado								
*	Información no facilitada por el suministrador por ser confidencial								
**	La proporción de agua en este caso es respecto al peso de la mezcla en seco, no respecto al cemento								

El relleno diseñado con arena caliza no pudo emplearse debido a la no disponibilidad de este árido con la granulometría requerida en las proximidades de la obra. Por ello, se decidió sustituir por un relleno comercial proporcionado por *COPSA S.A.*, al que se denominó G₁. Este relleno era principalmente una mezcla de bentonita y cemento que contenía arena silíceo y grafito en menor medida como adiciones para mejorar su conductividad térmica. Se desconoce la proporción de cada uno de los componentes en la mezcla final ya que está sujeto a confidencialidad. La Tabla 27 muestra la granulometría en seco del relleno G₁, determinada de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-1:1999.

Para los rellenos de RCD (G₂) y arena silíceo (G₃) la proporción de árido respecto al cemento en peso fue la misma a la propuesta a partir de los ensayos en laboratorio ya que si bien el RCD no era el mismo, la granulometría era similar, lo que permitió confeccionar la mezcla para la consistencia establecida sin sufrir segregación.

Tabla 27. Granulometría del mortero G₁ empleado en obra.

Tamiz UNE (mm)	Peso Acumulado	% Retenido	% Pasa
4	0	0	100
2	0	0	100
1	0	0	100
0,5	34,5	5,8	94,3
0,25	229	38,2	61,8
0,125	407,05	58,2	41,8
0,063	541,55	78,1	21,9

Por último, en el caso del relleno de escoria (G_4), la empresa constructora encargada de aportar el material decidió cambiarla por la escoria de acería LD por razones económicas. Debido a las grandes diferencias granulométricas existentes entre ambas escorias, resultó necesario reducir la proporción de árido respecto al cemento empleada respecto a la calculada para la EAE inicial.

Durante los ensayos realizados en laboratorio se comprobó la dificultad de obtener consistencias más fluidas al rango establecido ya que las mezclas se mostraron sensibles a la cantidad de agua de amasado empleada. Para que, en caso de ser necesario, se pudiera añadir más agua a la mezcla y así facilitar su inyección sin sufrir problemas de segregación, se decidió añadir un 4% de bentonita a los rellenos G_2 , G_3 y G_4 . Por consiguiente, se debió reajustar su cantidad de agua para que cumpliera con la consistencia establecida. En el caso del relleno G_1 , la cantidad de agua la determinó el propio fabricante del relleno.

4.3 CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO

Dado que el TRT solamente permite la caracterización térmica del intercambiador ensayado in situ, para el contraste de los resultados obtenidos en obra con los de laboratorio únicamente se fabricaron probetas de conductividad térmica.

El procedimiento de amasado del G_1 fue el mismo al empleado para la lechada de cemento, mientras que para las mezclas G_2 , G_3 y G_4 el procedimiento llevado a cabo fue el mismo al utilizado para los rellenos con contenido de árido. Ambos procedimientos se han descrito en el apartado 3.5.3.

Inmediatamente después de la finalización de cada amasado, se recogió una muestra de 5 l y se realizaron los ensayos de consistencia mediante la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3:2000/A2:2007), evaluando así la validez de esas amasadas. A continuación, se realizó el ensayo densidad aparente del mortero en fresco (UNE-EN 1015-6:1999).

Entonces se procedió al llenado de los moldes, dejando que el mortero curase a temperatura ambiente y cubriéndose con un plástico para preservar el agua de amasado durante 48 h, de forma que el mortero adquiriera la resistencia suficiente como para que fuera posible la retirada de los moldes. Finalmente, las probetas se sumergieron en agua a 20°C hasta completar los 28 días de curado establecidos.

Por otra parte, y a diferencia de lo realizado en el capítulo 3, la conductividad térmica de los rellenos se determinó tanto con el contenido volumétrico de agua de las probetas a los 28 días de curado, como una vez secadas en estufa hasta masa

constante, ya que se previó que debido a la proximidad del nivel freático a la superficie, el relleno inyectado estaría sumergido en agua.

Para ello, se utilizó la máquina TPSYS02 de Hukseflux, siguiéndose el procedimiento ya descrito en el apartado 3.3.5.2. En primer lugar, se determinó la conductividad térmica de las probetas sumergidas en agua, pero dejando la cara superior al descubierto para evitar que el calor aportado por la aguja durante el ensayo se disipara al agua (Fig. 62). A continuación, se secaron las probetas hasta llegar a masa constante, tras lo cual se dejaron las probetas durante 24h a temperatura ambiente para que alcanzaran el equilibrio térmico necesario para la realización del ensayo.

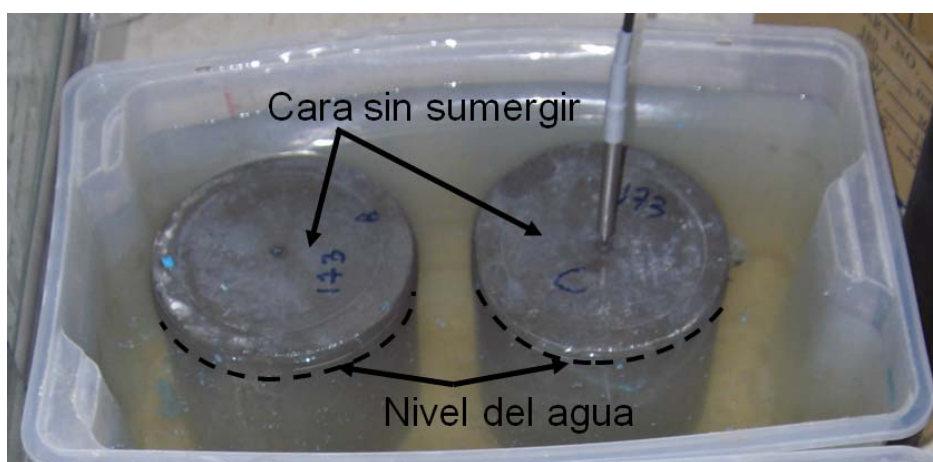


Fig. 62. Determinación de la conductividad térmica del mortero sumergido en agua.

4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS VERTICALES IN SITU

4.4.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS

En este apartado se describe el procedimiento llevado a cabo para la ejecución de la instalación geotérmica piloto. La construcción de los intercambiadores fue realizada por *Contratas Iglesias, S.A.* de acuerdo al procedimiento constructivo empleado anteriormente en otras instalaciones geotérmicas similares. Sin embargo, en esta tesis se describen diferentes aspectos constructivos que deben ser mejorados para tener un mayor control sobre la configuración final del intercambiador construido. A lo largo de este capítulo se proponen alternativas para la mejora de los inconvenientes detectados durante la construcción de la instalación.

El procedimiento constructivo de cada uno de los intercambiadores contó con 3 fases que se ejecutaron de forma sucesiva:

- Realización de las perforaciones.
- Introducción de la sonda intercambiadora de calor.
- Inyección del relleno geotérmico.

La construcción de cada intercambiador requirió de al menos un día para la realización de la perforación, introducción de las sondas e inyección del relleno, resultando un tiempo de trabajo final de tres semanas durante el mes de junio del año 2011.

4.4.1.1 Perforación del terreno

El método de perforación depende del tipo de terreno excavado. De acuerdo a la información disponible en la hoja 372 del mapa geológico *Magna50* facilitada por el *Instituto Geológico y Minero de España*, el terreno donde se construyeron los sondeos se ubica dentro del Sistema Terciario Detrítico del Duero. Está compuesto por un conjunto de capas lenticulares permeables (arenas, gravas, etc.) englobadas en una matriz más o menos semipermeable que se comporta a nivel regional como un gran acuífero heterogéneo y anisótropo, confinado a semi-confinado según las zonas. Se trata de un terreno arcilloso-arenoso en el que debido al diámetro y profundidad de los sondeos se optó por emplear un sistema de perforación a rotación con lodos en circulación directa y encamisado simultáneo hasta el fondo de la perforación.

Para ello se empleó una perforadora *Comacchio MC 900P* especialmente diseñada para la realización de todo tipo de perforaciones geotérmicas. La Fig. 63 muestra la disposición de la máquina y los decantadores de lodos de perforación empleados en obra.



Fig. 63. Perforadora empleada.

4.4.1.2 Introducción de las sondas

La Fig. 64 muestra la configuración de sondas empleadas y un esquema del procedimiento llevado a cabo para su introducción en la perforación. Se emplearon sondas geotérmicas de doble U de polietileno de alta densidad (PEAD), de 32 mm diámetro exterior y un espesor de 2,9 mm. Para la posterior inyección del mortero de relleno se introdujo, al mismo tiempo que la sonda, una tubería de PEAD de 32 mm de diámetro nominal de similares características capaz de resistir una presión nominal de hasta 16 bares. Además, se ataron las sondas en U a la propia tubería de inyección para asegurar una distancia mínima entre tubos de 64 mm.

La introducción de la sonda se llevó a cabo inmediatamente después de la realización de cada perforación, como se muestra en la Fig. 64. Para facilitar la introducción de las sondas por gravedad dentro de la perforación, se rellenaron con agua para que el empuje de flotación fuera mínimo. Sin embargo, durante la retirada de la entubación de la primera perforación se observó que las sondas a su vez tendían a salir de la perforación por el rozamiento que ejercía la camisa sobre la entubación en su movimiento ascensional. Para evitarlo, se lastraron las sondas en doble U con unos pesos que por las características de la perforación, no son recuperables (Fig. 64).

Para minimizar el riesgo de colapso de la perforación las camisas se retiraron una vez introducidas las sondas. De esta manera se evitó un rozamiento excesivo de las sondas con las paredes laterales de la perforación durante su descenso que pudiera provocar su fisuración e incluso su rotura.

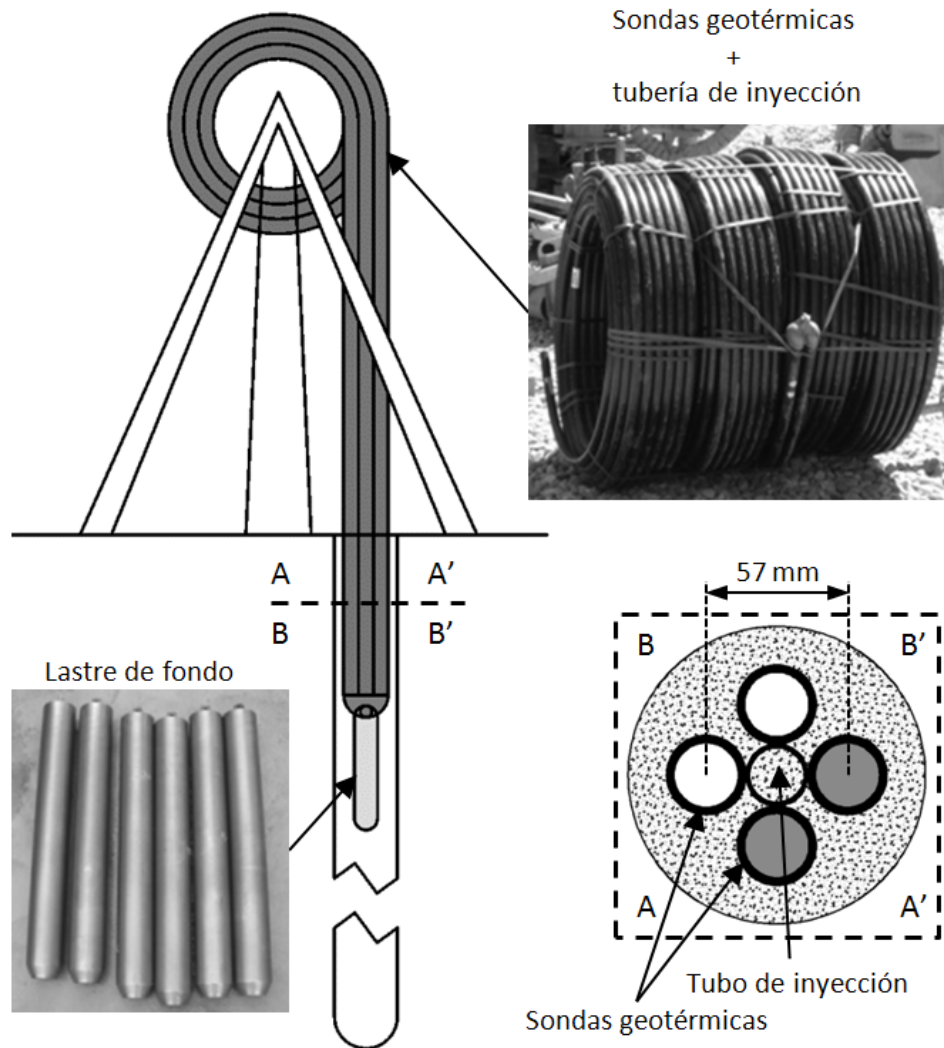


Fig. 64. Introducción de las sondas en la perforación realizada.

4.4.1.3 Inyección del relleno

La inyección del relleno se realizó inmediatamente después de la retirada de las camisas empleadas. La amasadora-inyectora empleada (Fig. 65) está especialmente diseñada para lechadas de bentonita y cemento, que son los rellenos más habituales en las instalaciones geotérmicas convencionales.

La Fig. 66 muestra un esquema de funcionamiento del equipo durante el amasado y la inyección del relleno. Esta amasadora mezcla los componentes mediante una hélice de eje vertical que tiene en el fondo del recipiente. La hélice genera un vacío que absorbe el relleno y lo hace circular por una tubería que termina de nuevo en el recipiente de mezcla (Fig. 66a). Por lo tanto, en primer lugar se debe añadir el agua, al que se añade progresivamente la cantidad de sólidos requerida. Una vez añadido todo el sólido y se finaliza el amasado, se circula toda la mezcla al depósito del inyector para proceder a la inyección del mortero (Fig. 66b).



Fig. 65. Amasadora e inyectora empleadas.

Este procedimiento fue válido para el relleno proporcionado por *COPSA S.A.* por tratarse de una lechada de bentonita, cemento y grafito (G_1). Sin embargo, durante la inyección del mortero S en la primera perforación se comprobó que los rellenos propuestos de S, LD y RCD (G_2 , G_3 y G_4) presentaban una segregación inicial que imposibilitaba la realización de la mezcla correctamente (Fig. 67). Debido al alto contenido de árido de la mezcla y a la necesidad de añadir el agua de amasado en primer lugar, el árido se acumuló en el fondo de la zona más alejada de la hélice, y como ya se había experimentado en otras ocasiones en laboratorio, se endureció rápidamente. Para dar solución a este problema se propusieron las siguientes alternativas:

1. Utilizar la misma amasadora planetaria empleada en laboratorio (Fig. 36). Esta opción se tuvo que descartar ya que no se encontró ninguna amasadora disponible de este tipo en el momento de realización de la obra.
2. Utilizar una amasadora de hormigón de tambor basculante convencional (Fig. 39). Su validez para fabricar las mezclas se comprobó durante el análisis de durabilidad de los rellenos llevado a cabo en el laboratorio. Si bien se consideró que era la mejor opción, al final no fue la elegida por la constructora debido a las dificultades iniciales que presentaba el paso del relleno de la amasadora a la inyectora y al límite de tiempo de realización de la obra.
3. Emplear una mezcladora manual de mortero cola para mejorar la mezcla en la amasadora disponible. Mediante la conexión a un taladro de una amasadora de morteros manual similar al empleado para la mezcla de lechada (Fig. 37), se consiguió mejorar la capacidad de mezcla de la amasadora inicial. Sin embargo, y aunque en menor medida, se siguió experimentando segregación.

En cualquier caso, y por ser la solución más inmediata y económica, esta fue la alternativa elegida.

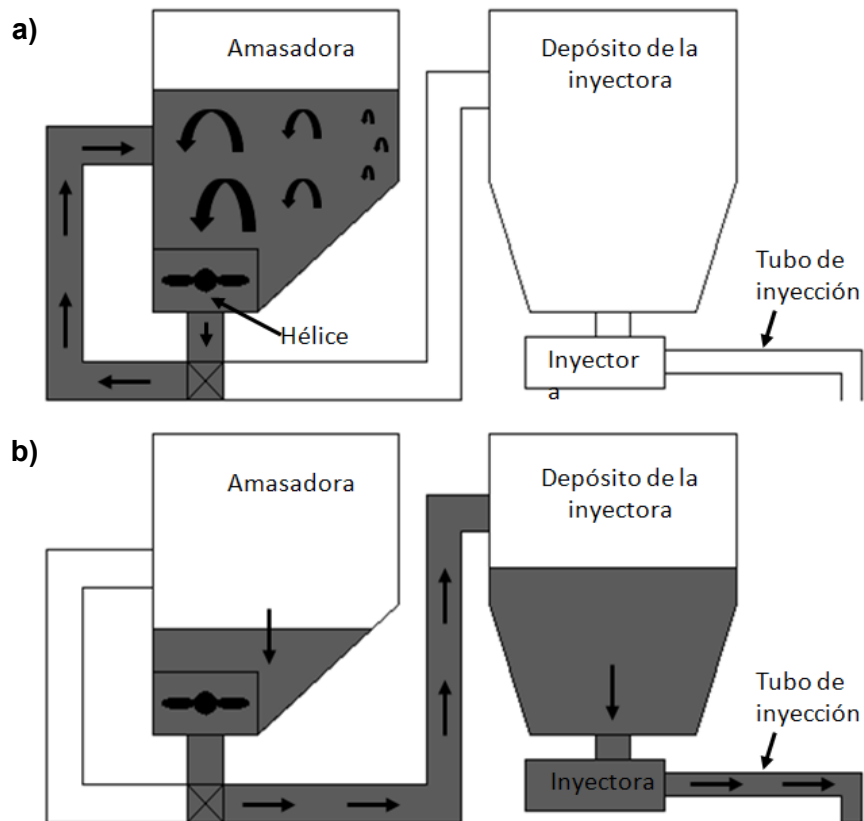


Fig. 66. Esquema de funcionamiento de la amasadora e inyectora empleadas:
a) amasado y b) inyección del relleno.



Fig. 67. Segregación experimentada para el relleno G₃.

La Fig. 68 muestra de manera secuencial el procedimiento de inyección llevado a cabo. El relleno se inyectó desde el fondo en todo momento, por lo que ascendió por la perforación hasta llegar a la superficie. Al inicio de la inyección, el relleno se mezcló parcialmente con la mezcla de agua y lodos de perforación presentes en el interior del intercambiador hasta que alcanzó la altura de la boca del tubo de inyección (Fig. 68a). Debido a su mayor densidad, el relleno desplazó los lodos de perforación provocando su ascenso a través de la perforación hasta su expulsión al exterior (Fig. 68b). Además, el propio relleno introducido previamente evitó el lavado del relleno en proceso de inyección. La inyección del relleno finalizó en el momento en el que se observó que el material saliente de la perforación en superficie era el propio relleno (Fig. 68c), permitiendo un sobrenadado para eliminar posibles restos del lodo de perforación empleado, tal y como se recomienda en la bibliografía consultada [117].

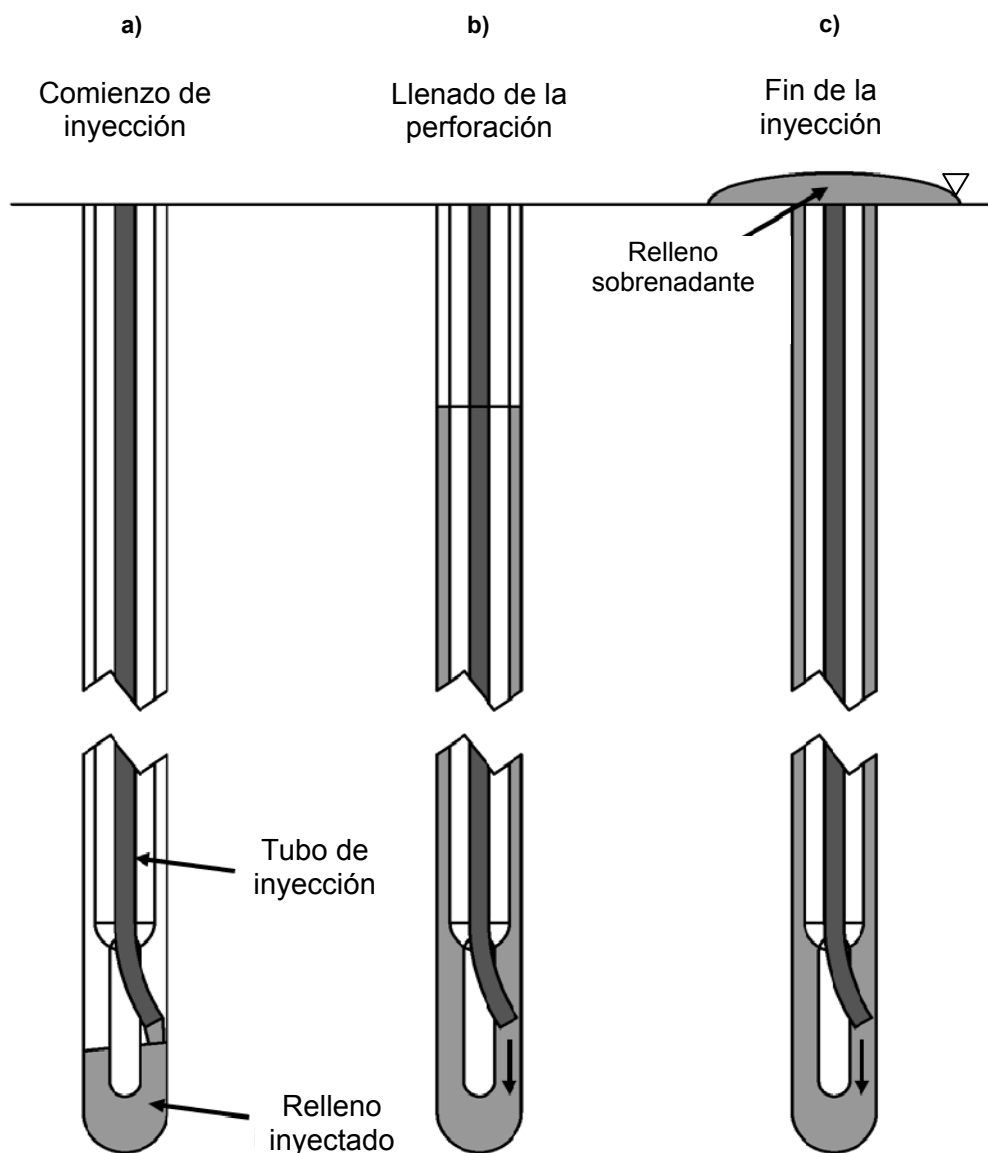


Fig. 68. Procedimiento de inyección del relleno realizado.

Se inyectaron los cuatro rellenos finalmente propuestos. Debido a la especial dificultad de inyección que presentó el relleno G_4 , se decidió inyectar únicamente dos perforaciones respecto a las tres inicialmente planeadas. Por otra parte, la segunda perforación realizada no se pudo rellenar con el relleno G_3 debido al colapso de las paredes de la perforación, por lo que se considera que esta perforación tiene relleno natural. Así, la disposición final de los rellenos en los intercambiadores de calor quedó de la siguiente manera (Fig. 69):

- 3 perforaciones con relleno G_1 (relleno comercial)
- 3 perforaciones con relleno G_2 (relleno con RCD como árido principal)
- 3 perforaciones con relleno G_3 (relleno con S como árido principal)
- 2 perforaciones con relleno G_4 (relleno con escoria LD como árido principal)
- 1 perforación con relleno natural

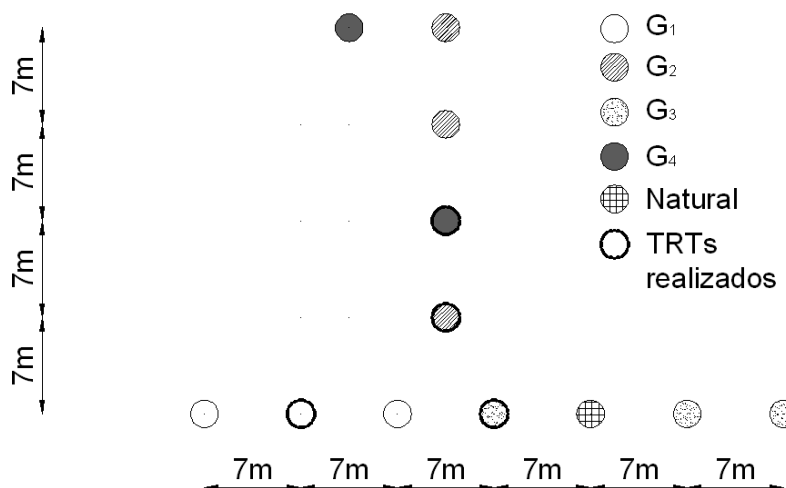


Fig. 69. Disposición final en planta de los rellenos inyectados.

Finalmente, durante esta fase se recogieron muestras en obra de cada tipo de relleno inyectado. Con ellas que se fabricaron probetas de conductividad térmica para su posterior análisis en laboratorio. Para contrastar los resultados de las muestras recogidas en obra con una mezcla del mismo relleno fabricada en condiciones más controladas, se fabricaron probetas en laboratorio. Esto permitió cuantificar la influencia de la segregación experimentada en los rellenos inyectados debido al procedimiento de amasado e inyección empleado.

4.4.2 TESTS DE RESPUESTA TÉRMICA

4.4.2.1 Descripción del equipo y procedimiento de ensayo realizado

El equipo necesario para la realización de un Test de Respuesta Térmica (TRT) debe permitir una inyección de calor constante durante el transcurso del ensayo. Para ello, es necesario que tanto el caudal como la potencia térmica suministrada por el equipo

sean constantes. La Fig. 70 muestra el equipo de ensayo utilizado y las conexiones de entrada y salida del equipo al intercambiador geotérmico ensayado. La máquina tiene una alimentación trifásica y cuenta con una bomba hidráulica *Smeedegard EV 2-72-2C* que permite recircular a tres niveles de caudal constante diferentes. El caudal de ensayo final se reguló mediante una válvula de equilibrado. La medición del caudal se llevó a cabo mediante un caudalímetro *Kobold DRG 1860* con una precisión del 3%.

La potencia térmica necesaria se suministró directamente al agua recirculada en el calentador de agua que contiene 3 resistencias de 3 kW, cada una conectada a una fase diferente. Las temperaturas de entrada y salida del agua se determinaron a partir de dos termopares tipo *K* con una precisión de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. El equipo se configuró de tal manera que el caudal y las temperaturas de entrada y salida del fluido portador de calor se registraran cada 30 s mediante los dataloggers *Testo 175-S2* y *Testo 177-T4* instalados, respectivamente.

Los ensayos se realizaron una vez terminada la ejecución de todas las sondas geotérmicas, previo a la conexión final de los intercambiadores con la sala de máquinas. El tiempo de espera desde la inyección del relleno hasta la realización del ensayo se estimó en al menos 14 días, con el fin de que el calor de hidratación del mismo no influyese en el resultado final del TRT. El procedimiento llevado a cabo para la realización de cada TRT se dividió a su vez en tres etapas diferentes.

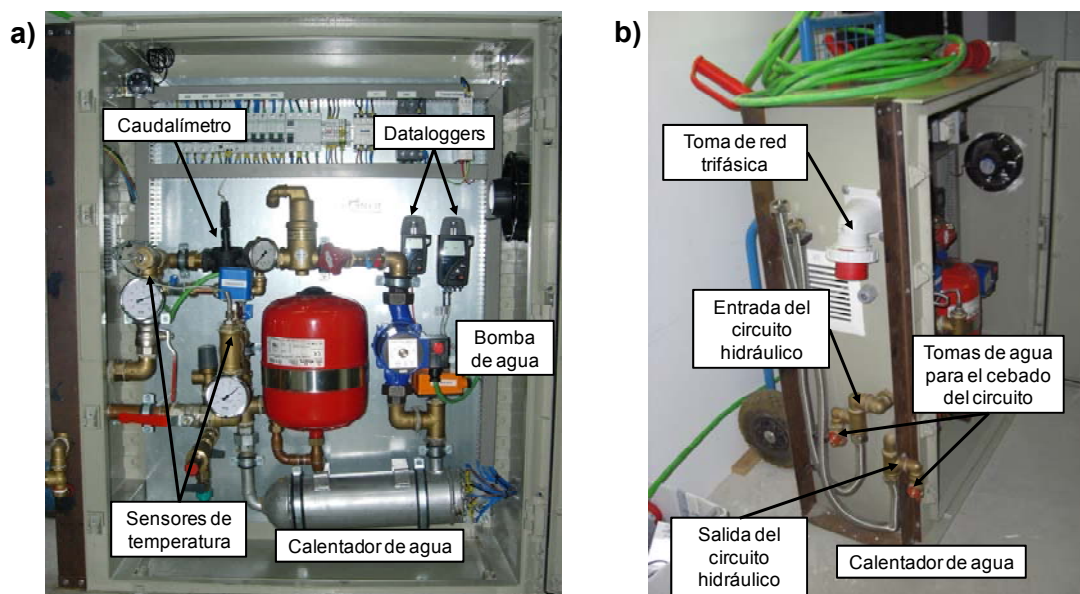


Fig. 70. a) Componentes principales del equipo utilizado y b) tomas eléctrica y de entrada y salida del circuito hidráulico.

En primer lugar se determinaron las condiciones térmicas iniciales del terreno a partir de la medición del perfil de temperaturas vertical del terreno sin perturbar. La medición se realizó introduciendo una sonda *Level Troll series 500* de la marca *In situ* por uno de los 4 tubos del intercambiador geotérmico. Se trata de una sonda especial para

medir temperaturas en acuíferos, que cuenta con un sensor de temperatura pt1000 y un manómetro de alta precisión. La incertidumbre de la medida es de 0,1°C y 1% de temperatura y presión, respectivamente. La sonda se programó para que registrara medidas cada 2 s, iniciándose antes del comienzo del comienzo del ensayo.

El procedimiento de medición se muestra de manera esquemática en la Fig. 71. Para posibilitar el manejo de la sonda a lo largo de toda la perforación, se hizo uso de una caña de pescar convencional. La sonda se introdujo hasta una profundidad de 3 m medido con el contador que lleva incorporado el carrete de la caña de pescar, dejándola a esa altura durante 5 minutos para que se adaptara a la temperatura del agua y no afectara la posible inercia térmica que tuviera la propia sonda.

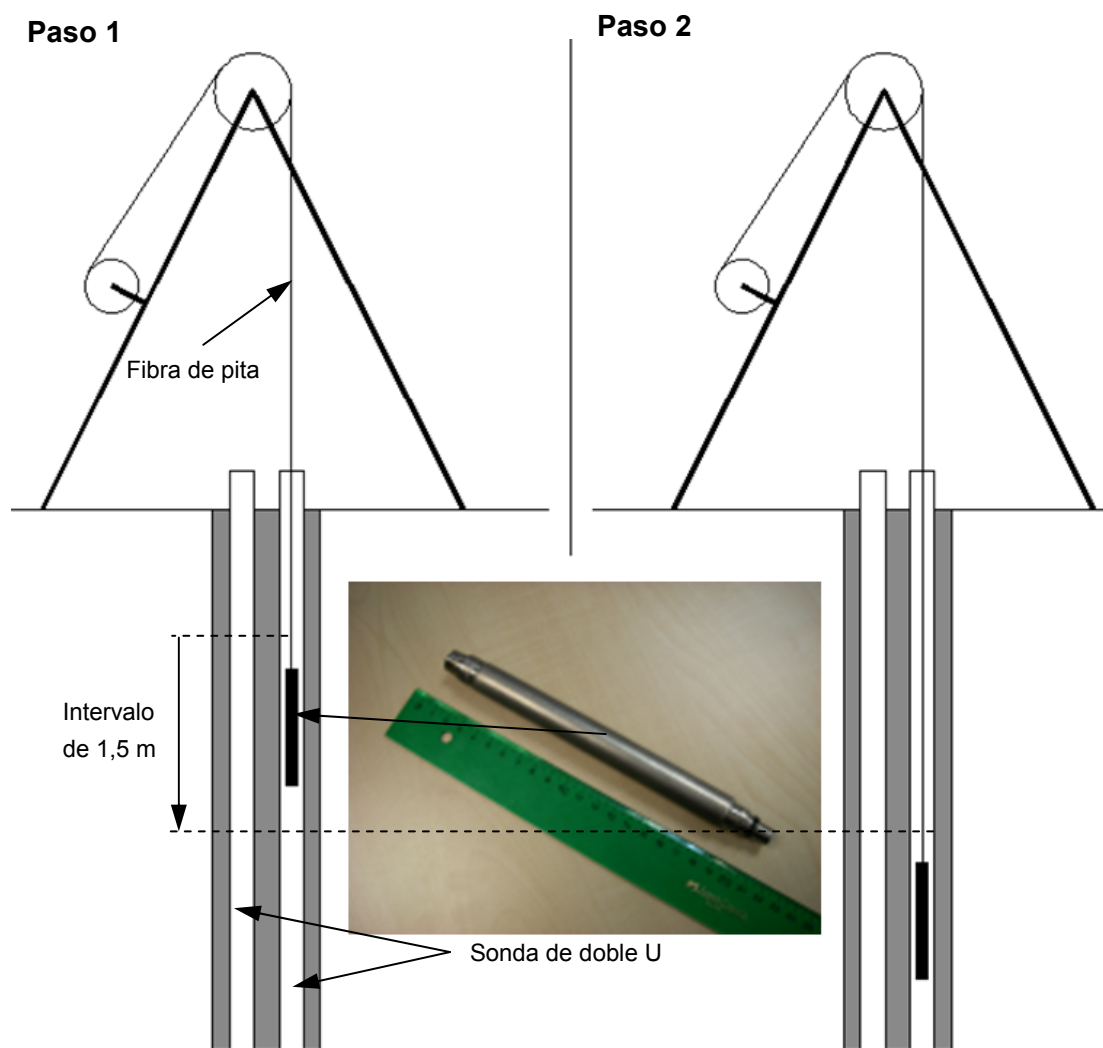


Fig. 71. Esquema del procedimiento de medición de los perfiles verticales de temperatura.

A continuación, se descendió aproximadamente 1,5 m en un tiempo de 2-3 segundos, parando durante otros 5-10 segundos. Se repitió este ciclo hasta llegar al fondo, calculado en 95-100 m. Una vez alcanzado el fondo, se dejó la sonda en reposo durante 5 minutos para que se adaptara a la temperatura del fondo. El tramo de

ascenso se midió según el mismo procedimiento cíclico que el descenso, debiéndose repetir hasta la recuperación por salida al exterior de la sonda. Por último, partiendo de los resultados obtenidos cada 2s, la temperatura para cada 2 m de profundidad se obtuvo promediando los datos disponibles en cada intervalo.

Finalmente se realizó el TRT. La Fig. 72 muestra el esquema de conexiones hidráulicas necesario para la realización de TRT (a), el intercambiador ensayado previo al montaje del ensayo (b) y la disposición de la máquina durante uno de los ensayos realizados (c).

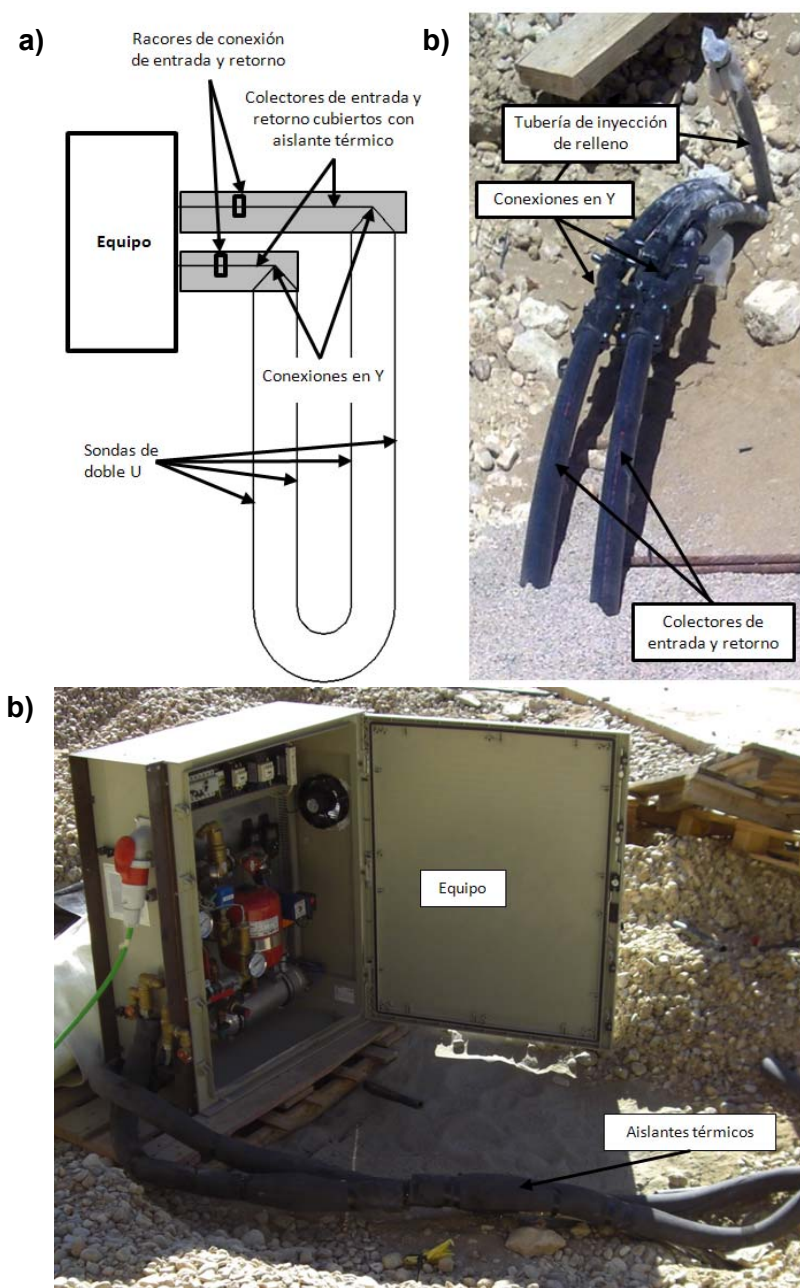


Fig. 72. a) Esquema de conexión hidráulica del equipo con el intercambiador ensayado, b) detalle del intercambiador previo a la conexión del equipo y c) equipo listo para la realización del ensayo.

En primer lugar se ejecutaron las conexiones eléctricas e hidráulicas necesarias. Una vez realizadas las conexiones, se rellenó el circuito de agua hasta una presión de 2,5 bares mediante una bomba de poca potencia destinada a cebar circuitos de suelo radiante. Debido al reajuste de las piezas que conforman el circuito, a la expulsión del aire ocluido y al aumento de temperatura del fluido empleado y consiguiente dilatación de la sonda, la presión se redujo hasta 2 bares. A continuación, se comprobaron todas las uniones realizadas para verificar que no existía pérdida de agua que hiciera descender la presión por debajo de la presión mínima de 1 bar requerida para el correcto funcionamiento del equipo.

Una vez asegurado el circuito hidráulico, se colocó un aislante térmico en el tramo de sondas expuesto al exterior para minimizar las pérdidas de calor que pudieran afectar al ensayo. Por otra parte, para evitar en la medida de lo posible la influencia de la radiación solar, se cubrieron tanto la máquina como la parte de las sondas expuesta al sol.

Una vez la máquina estaba preparada para el ensayo, se encendió únicamente la bomba de circulación del agua y se mantuvieron desconectadas las resistencias eléctricas hasta que el caudal de diseño se estabilizó a un valor constante de 16 l/min. El caudal establecido permite que la circulación de agua se encuentre en régimen turbulento, lo que resulta necesario para maximizar la transferencia de calor entre el fluido y las sondas. Transcurridos 20 min y una vez observada la estabilización del caudal y de las temperaturas de entrada y salida, se conectaron dos de las tres resistencias eléctricas disponibles para aportar una potencia de calor constante de 6 kW. Durante 48 h se inyectó calor de manera constante, registrándose los valores de caudal, temperatura de entrada y temperatura de salida cada 30 s.

4.4.2.2 Metodología de análisis de los resultados obtenidos en el TRT

La metodología de análisis de los datos se basó en la teoría *ILS* adaptada por Mogensen al caso de los TRTs [63]. Para calcular las propiedades térmicas del terreno a partir de la teoría *ILS*, en primer lugar se tuvo que establecer el intervalo de tiempo sobre el cual se realizó el ajuste por mínimos cuadrados. Para que la teoría *ILS* fuera de aplicación fue necesario descartar los datos iniciales obtenidos para eliminar cualquier posible influencia de la configuración del intercambiador ensayado en la determinación de la conductividad térmica del terreno. Este tiempo inicial (t_{min}) se calculó a partir de la ecuación (23). Por otra parte, Gehlin y Hellström [68] establecieron que la duración mínima del ensayo (t_{max}) se podía calcular a partir de la ecuación (24).

$$t_{min} \geq \frac{5 \cdot r_b^2}{\alpha} \quad (23)$$

$$t_{max} \geq \frac{50 \cdot r_b^2}{\alpha} \quad (24)$$

Como se puede apreciar, el intervalo de tiempo máximo queda determinado por el radio de la perforación y por la difusividad térmica del terreno, cuyo valor es desconocido. Por lo tanto, su valor se tuvo que estimar a partir de la conductividad térmica y del calor específico volumétrico del terreno, valores que se obtuvieron a partir de la norma VDI 4640. Así, para una conductividad térmica de 2,5 W/(m K) y un calor específico estimado de 2,5 MJ/m³ (arena saturada de agua), se estimó una difusividad térmica de 10⁻⁶ m²/s, lo que para un radio de perforación (r_b) de 0,06 m estableció un intervalo de tiempo máximo de entre 18 000 s y 180 000 s, esto es, aproximadamente entre 5 y 48 h.

De manera similar a Bandos *et al.* [57], y con el objetivo de observar la influencia del intervalo de tiempo empleado en las propiedades térmicas estimadas, se variaron los tiempos iniciales y finales del ajuste con un intervalo mínimo de 24h, lo que resultó en las combinaciones que se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Combinaciones de tiempo inicial y final analizados.

Tiempo inicial (t _i)-Tiempo final (t _f)										
5-29	5-30	5-31	5-32	5-33	...	5-44	5-45	5-46	5-47	5-48
	6-30	6-31	6-32	6-33	...	6-44	6-45	6-46	6-47	6-48
		7-31	7-32	7-33	...	7-44	7-45	7-46	7-47	7-48
			8-32	8-33	...	8-44	8-45	8-46	8-47	8-48
				9-33	...	9-44	9-45	9-46	9-47	9-48
					...	...	...	...	...	...
						20-44	20-45	20-46	20-47	20-48
							21-45	21-46	21-47	21-48
								22-46	22-47	22-48
									23-47	23-48
										24-48

4.4.2.2.1 Cálculo de la potencia térmica inyectada al terreno durante el ensayo

La potencia térmica inyectada $Q(t)$ en el terreno durante el ensayo se calculó a partir de las temperaturas de entrada y salida del fluido y del caudal de ensayo medidos por el equipo (25):

$$Q(t) = \dot{m}(t) \cdot c_f \cdot |T_1(t) - T_2(t)| \quad (25)$$

Donde,

- $\dot{m}$ es el caudal total circulado (kg/s)
- c_f es el calor específico del agua (J/(kg K))
- T_1 es la temperatura del fluido portador de calor en la salida del equipo (°C o K)
- T_2 es la temperatura del fluido portador de calor en el retorno al equipo (°C o K)

La potencia térmica media de cada ensayo $\bar{Q}$ se calculó a partir de la media de la potencia instantánea $Q(t)$ calculada por la ecuación (25) para el intervalo máximo de ensayo establecido. Sin embargo, y pese a que en este caso el equipo se cubrió y se aisló térmicamente respecto al exterior para que la influencia del ambiente fuera mínima, aún era posible que ocurriera un intercambio de calor indeseado con el exterior que influyera en la potencia inyectada del ensayo.

Para cuantificar la influencia de la temperatura ambiente sobre la potencia térmica aportada por el equipo, se determinó la desviación de la potencia instantánea respecto a la media del ensayo y se le aplicó la corrección mostrada en la ecuación (26):

$$DQ^*(t) = DQ(t) - N \cdot [T_a(t - \phi) - (\overline{T_f(t)} - T_a(t - \phi))] \quad (26)$$

Donde,

- $DQ^*(t)$ es la diferencia entre la potencia instantánea calculada una vez corregida la influencia de la temperatura ambiente y la potencia media inyectada en el ensayo (W)
- $DQ(t)$ es la diferencia entre la potencia instantánea calculada y la potencia media inyectada (W)
- N es una constante de corrección a determinar (-)
- ϕ es el desfase de tiempo existente entre la temperatura ambiente y el momento en el que se nota su influencia en la potencia instantánea (s)

Para su determinación, en primer lugar se estableció el rango de valores para ambos parámetros: $N_1, N_2, N_3, \dots, N_u$ y $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_v$. El rango de N se determinó en función de la máxima diferencia observada entre la potencia media inyectada durante el ensayo y las potencias instantáneas empleadas para su determinación, así como la diferencia máxima registrada entre la temperatura media del fluido y la temperatura ambiente exterior. En cuanto al rango de ϕ , se estableció un desfase de hasta 6 horas entre la temperatura ambiente exterior y su efecto en la temperatura media registrada por el ensayo. Para todas las combinaciones de N_u y ϕ_v se calculó DQ^* a partir de la ecuación (26), determinándose su desviación típica para el intervalo máximo de ensayo disponible (5-48h). Como resultado, se escogió la combinación de N y ϕ que menor desviación típica presentara.

4.4.2.2.2 Determinación de la conductividad térmica y la resistencia térmica de la perforación

El procedimiento llevado a cabo para la obtención de los parámetros térmicos del terreno y de la perforación se basó en la realización de ajustes lineales por mínimos cuadrados de los datos obtenidos a partir de la ecuación (27).

Para cada intervalo de tiempo t_i - t_j previamente establecido se obtuvieron los coeficientes que C_1 y C_2 que definen la recta de ajuste por mínimos cuadrados obtenida. A partir de ambas constantes, se calculó en primer lugar la conductividad térmica del terreno $\lambda(t_i, t_j)$ y en segundo lugar la resistencia térmica de la perforación $R_b(t_i, t_j)$ a partir las ecuaciones (28) y (29), respectivamente.

$$T_f(t) = C_1 \cdot \ln(t) + C_2 \quad (27)$$

$$\lambda_{\text{terreno}}(t_i, t_j) = \frac{\bar{Q}}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot C_1} \quad (28)$$

$$R_b(t_i, t_j) = \frac{H}{\bar{Q}} \left(C_2 - T_0 - \frac{\bar{Q}}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot \lambda_{\text{terreno}}(t_i, t_j)} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) \right) \quad (29)$$

Donde,

- H es la profundidad de la perforación (m)
- T_0 es la temperatura media sin perturbar del terreno (°C)
- r_b es el radio de la perforación (m)
- γ es la constante de Euler (0,5772)

Por último, la bondad del ajuste de cada intervalo de tiempo se determinó a partir del coeficiente de correlación $R^2(t_i, t_j)$ del ajuste realizado. Al realizarse esta operación para todos los intervalos de tiempo propuestos, se obtuvieron como resultado las matrices de conductividad térmica $\Lambda[t_i, t_j]$, de resistencia térmica de la perforación $R_b[t_i, t_j]$ y del coeficiente de correlación del ajuste lineal $R^2[t_i, t_j]$.

Una vez obtenidas las matrices de resultados de cada caso, la conductividad térmica, la resistencia de la perforación y el R^2 finales se obtienen a partir de la media de todos los valores de la matriz correspondiente.

Como se muestra posteriormente en el análisis de resultados, se detectó una clara influencia de la temperatura ambiente en los resultados obtenidos. Para eliminar su influencia, se propuso corregir la temperatura media del fluido a partir de la ecuación (30):

$$T_{f*}(t) = T_f(t) + k \cdot [T_f(t) - T_a(t - \varphi) - \overline{(T_f(t) - T_a(t - \varphi))}] \quad (30)$$

Donde,

- T_{f*} es la temperatura media del fluido portador de calor corregida (°C)
- T_f es la temperatura media del fluido portador de calor registrada (°C)
- k es una constante a determinar (-)

- φ es el desfase de tiempo existente entre la temperatura ambiente y su influencia en el ensayo (s)
- T_a es la temperatura ambiente en el lugar del ensayo ($^{\circ}\text{C}$)
- $(T_f(t) - T_a(t - \varphi))$ es la media de la diferencia de temperaturas existente en cada momento entre T_f y T_a ($^{\circ}\text{C}$)

Los valores de k y φ finales (k_{final} y φ_{final}) se obtuvieron mediante el proceso que se explica a continuación. En primer lugar, se estableció el rango de valores para ambos parámetros: $k_1, k_2, k_3, \dots, k_u$ y $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_v$. El rango de k se determinó en función de la máxima diferencia de temperatura observada entre T_f y T_a en cada momento respecto a su media calculada para todo el ensayo. En cuanto al rango de φ , se estableció un desfase de hasta 6 horas entre la temperatura ambiente exterior y su efecto en la temperatura media registrada por el ensayo. Para cada combinación de k_u y φ_v se determinó la temperatura media del fluido corregida T_{f*} a partir de la ecuación (30).

A continuación, se calculó la matriz de conductividades térmicas ($\Lambda[t_i, t_j]_{u,v}$) y con ella la media $\mu(k_u, \varphi_v)$ y desviación típica $\sigma(k_u, \varphi_v)$ de todas las conductividades que contenía, como se muestra en la Tabla 29. Por último, se escogió la combinación de k y φ ($k_{\text{final}}, \varphi_{\text{final}}$) que menor desviación típica de λ presentó, y se calcularon las matrices de conductividad térmica $\Lambda[t_i, t_j]$, resistencia térmica a la perforación $R_b[t_i, t_j]$ y coeficiente de correlación del ajuste lineal $R^2[t_i, t_j]$ correspondientes.

Tabla 29. Obtención de $\sigma(k_u, \varphi_v)$ para cada combinación de k y φ analizadas.

	k_1	k_2	k_3	...	k_u
φ_1	$\Lambda[t_i, t_j]_{1,1} \rightarrow \sigma(k_1, \varphi_1)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{2,1} \rightarrow \sigma(k_2, \varphi_1)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{3,1} \rightarrow \sigma(k_3, \varphi_1)$	...	$\Lambda[t_i, t_j]_{u,1} \rightarrow \sigma(k_u, \varphi_1)$
φ_2	$\Lambda[t_i, t_j]_{1,2} \rightarrow \sigma(k_1, \varphi_2)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{2,2} \rightarrow \sigma(k_2, \varphi_2)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{3,2} \rightarrow \sigma(k_3, \varphi_2)$	...	$\Lambda[t_i, t_j]_{u,2} \rightarrow \sigma(k_u, \varphi_2)$
φ_3	$\Lambda[t_i, t_j]_{1,3} \rightarrow \sigma(k_1, \varphi_3)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{2,3} \rightarrow \sigma(k_2, \varphi_3)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{3,3} \rightarrow \sigma(k_3, \varphi_3)$	...	$\Lambda[t_i, t_j]_{u,3} \rightarrow \sigma(k_u, \varphi_3)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
φ_v	$\Lambda[t_i, t_j]_{1,v} \rightarrow \sigma(k_1, \varphi_v)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{2,v} \rightarrow \sigma(k_2, \varphi_v)$	$\Lambda[t_i, t_j]_{3,v} \rightarrow \sigma(k_3, \varphi_v)$	...	$\Lambda[t_i, t_j]_{u,v} \rightarrow \sigma(k_u, \varphi_v)$

Una vez obtenidos los resultados finales, se observó el tipo de distribución al que se ajustan los valores de conductividad térmica y de resistencia térmica de la perforación obtenidos. Como los datos se obtuvieron a partir de la serie temporal de la temperatura media del fluido portador de calor, se asumió que la distribución que mejor se ajustaba a ambos parámetros era la función *lognormal* en base natural (31):

$$f(x)_{k_{final}, \varphi_{final}} = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_{k_{final}, \varphi_{final}}}{\sigma_{k_{final}, \varphi_{final}}} \right)^2}}{x \cdot \sigma_{k_{final}, \varphi_{final}} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (31)$$

Donde:

- x es cada valor de conductividad térmica o resistencia térmica de la perforación de la matriz correspondiente para la combinación de k_{final} y φ_{final}
- $\mu_{k_{final}, \varphi_{final}}$ es la media de todos los valores de conductividad térmica o resistencia térmica de la perforación de la matriz correspondiente para la combinación de k_{final} y φ_{final}
- $\sigma_{k_{final}, \varphi_{final}}$ es la desviación típica de todos los valores de conductividad térmica o resistencia térmica de la perforación de la matriz correspondiente para la combinación de k_{final} y φ_{final}

Así, en primer lugar se comprobó si los datos obtenidos se ajustaban a la distribución *lognormal* propuesta. A continuación se determinaron los parámetros que definían esta distribución para los ensayos realizados. Una vez determinados estos parámetros, se estableció un intervalo de confianza del 5% para la conductividad térmica y la resistencia térmica de la perforación obtenida a partir de la función de densidad *lognormal* (32):

$$F(x) = \Phi(x) \cdot \left(\frac{\ln(x) - \mu_{k_{final}, \varphi_{final}}}{\sigma_{k_{final}, \varphi_{final}}} \right) \quad (32)$$

Donde $\Phi(x)$ es la integral de Laplace (33):

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^x E^{\frac{t^2}{2}} \quad (33)$$

Por otra parte, la configuración de los cuatro intercambiadores ensayados era similar salvo por el tipo de relleno empleado. Por lo tanto, la diferencia de las resistencias térmicas tenía que deberse a la variación de las propiedades térmicas del relleno y a la efectividad del llenado de perforación realizado.

Sharqawy *et al.* [118], Raymond *et al.* [119] y Lamarche *et al.* [120] realizaron una recopilación de las fórmulas empleadas para la estimación de la resistencia térmica de la perforación a partir de su geometría y de la conductividad térmica del relleno. Todas las aproximaciones propuestas estiman que la resistencia térmica de la perforación disminuye si se aumenta la conductividad térmica del relleno.

Para la obtención de la conductividad térmica efectiva del relleno se empleó el software Earth Energy Designer [121]. Este programa permite estimar la resistencia

térmica de la perforación a partir del caudal de circulación empleado, de la geometría de la perforación, de las propiedades térmicas del material empleado en las sondas y del relleno geotérmico. En este caso, se varió el valor de conductividad térmica empleado para la estimación hasta que la resistencia térmica fuera la misma a la estimada a partir del ensayo.

Para ello, se despreció la resistencia térmica de contacto entre la sonda y el relleno ya que se tuvo en cuenta como parte de la conductividad térmica efectiva del relleno. El diámetro de la perforación fue de 120 mm y el caudal de circulación de agua en la sonda fue de 0,27 l/s (16 l/min). La sonda empleada tenía un diámetro nominal de 32 mm y un espesor de 2,9 mm. La conductividad térmica del PEAD se estimó en 0,42 W/(m K) [121] . Por último, se estableció una distancia entre tubos de 64 mm, dado que las sondas se encontraban unidas al tubo de inyección de 32 mm empleado.

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1 CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO

Los resultados de la caracterización de las muestras recogidas en obra así como de las probetas fabricadas en laboratorio se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Conductividad térmica de los rellenos inyectados y de las mezclas fabricadas en laboratorio.

Relleno	Conductividad térmica (W/(m K))			
	Laboratorio		Obra	
	Seco	Sumergido	Seco	Sumergido
G₁	0,64	1,04	0,61	1,02
G₂	1,05	1,16	0,84	1,07
G₃	1,05	1,61	1,51	2,02
G₄	0,77	0,90	0,81	0,97

La Fig. 73 muestra la situación de las probetas recogidas en obra una vez endurecidas. Debido a la segregación experimentada durante su amasado y a la falta de control de sus condiciones de curado y endurecimiento durante los primeros 2 días, las probetas se encontraban en muy mal estado, pese a lo cual se decidió determinar su conductividad térmica.

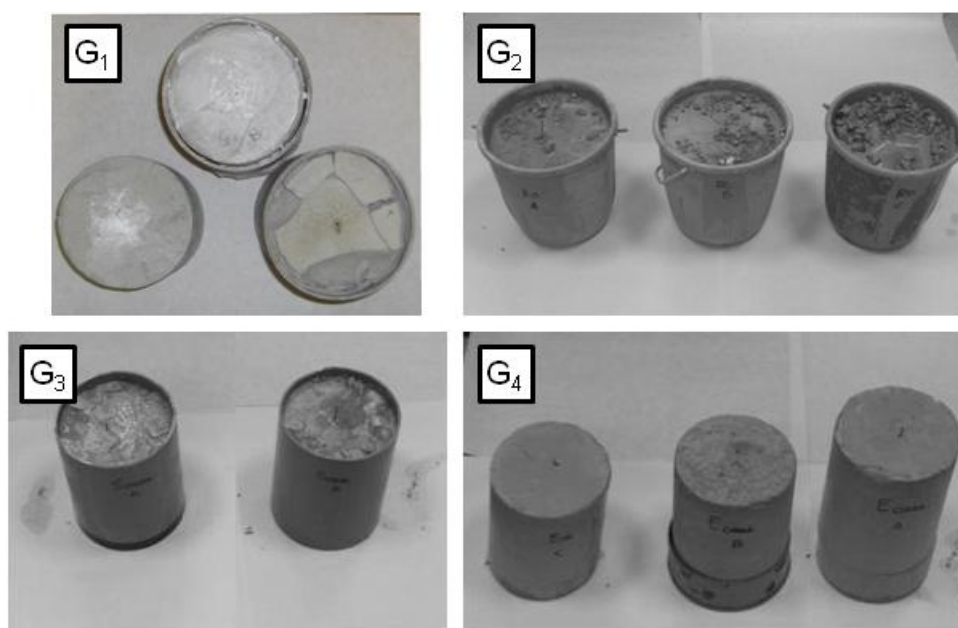


Fig. 73. Estado de las muestras recogidas en obra previo a la realización de los ensayos.

En el caso de los rellenos G₁, G₂ y G₄ las conductividades en seco y saturado observadas tanto en las probetas de obra como las fabricadas en laboratorio fueron similares (Tabla 30). Sin embargo, llamó la atención que el relleno G₃ presentara una mayor conductividad térmica en las probetas de obra que en las de laboratorio. Así, el relleno en laboratorio se realizó en base a la consistencia en estado fresco establecida

y no se apreció segregación. En cambio, las probetas recogidas en obra sufrieron segregación, lo que provocó que la parte superior de la probeta ensayada contuviera una mayor proporción de lechada (cemento, bentonita y agua) y la parte inferior una mayor proporción del árido empleado. En el caso del relleno G_3 , al experimentarse segregación las probetas de obra se rellenaron con un sobrenadado mayor al resto de los rellenos, por lo que el contenido en árido de las probetas aumentó respecto al que le correspondía para su volumen. Probablemente esto hizo que aumentara la conductividad térmica de las probetas de obra ensayadas.

Para futuros proyectos, debe realizarse una planificación más adecuada de todo el procedimiento de inyección, con especial atención al procedimiento de amasado-inyección y una recogida de muestras mejor planificada.

En cuanto a los resultados observados únicamente en las probetas de laboratorio, se constató una clara reducción de la conductividad térmica en seco del relleno G_3 respecto a la observada en el relleno S_2 correspondiente: $1,05 \text{ W/(m K)}$ frente a $1,99 \text{ W/(m K)}$). Dado que en ese caso la única variación en la dosificación se encontraba en la adición de bentonita y retardante de fraguado, y que el último no modifica a largo plazo las propiedades del relleno, se concluyó que la bentonita redujo de manera significativa la conductividad térmica del relleno. Por otra parte, se apreció una reducción del 38% de la conductividad térmica en el relleno G_1 debido al secado en estufa, mayor que para el resto de rellenos evaluados. Esto se debió, probablemente, a la mayor proporción de bentonita del mismo.

4.5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES GEOTÉRMICOS VERTICALES

4.5.2.1 Introducción

En este apartado se estudiaron los resultados obtenidos en los 4 TRTs realizados. Sin embargo, el ensayo realizado para el relleno G_4 se tuvo que descartar debido a una tormenta que ocurrió transcurridas 24 h de ensayo, imposibilitando la correcta finalización del mismo. Por lo tanto, el análisis de resultados se realizó finalmente con los ensayos G_1 , G_2 y G_3 .

En primer lugar se analizaron los perfiles de temperatura obtenidos en los 3 perfiles medidos que permitieron determinar las condiciones iniciales del terreno sin perturbar. A continuación, se estudió la influencia de la temperatura ambiente en la potencia inyectada, en la conductividad térmica del terreno y en la resistencia térmica de la perforación estimada. Para ello se llevó a cabo un análisis en paralelo de los resultados obtenidos con y sin corrección de la temperatura ambiente. Por último, el análisis se centró en los valores de resistencia térmica obtenidos que permitieron analizar la posible influencia del relleno empleado en la eficiencia térmica de la instalación.

4.5.2.2 *Análisis de las condiciones iniciales del terreno sin perturbar*

Los perfiles de temperatura obtenidos durante la realización de los cuatro TRTs se encuentran en el anexo de resultados A3.

En primer lugar se analizaron por separado los datos obtenidos durante el descenso y ascenso de la sonda para detectar posibles inercias térmicas en la misma. Como resultado, se obtuvieron perfiles similares al mostrado en la Fig. 74. En todos los casos existió una clara diferencia entre el perfil de temperaturas observado durante el descenso (T_{descenso}) y el observado durante el ascenso (T_{ascenso}).

Por un lado, la inserción de la sonda provocó el movimiento del agua en la dirección longitudinal de la tubería desfasando las temperaturas observadas. Durante el descenso el agua fue empujada hacia el fondo, lo cual implica que la temperatura observada a una profundidad fue en realidad la existente ligeramente más arriba. Durante el ascenso ocurrió el fenómeno contrario, con lo que se asumió que ambos fenómenos se anulaban entre sí. Por lo tanto, la temperatura resultante se calculó a partir de la media de la temperatura medida durante el ascenso y el descenso a la misma profundidad.

Por otro lado, la diferencia observada entre los perfiles de descenso y ascenso se acentuó en mayor medida a lo largo de los primeros 20 m de perforación debido al mayor gradiente térmico de esta zona, cuyo origen fue la afección de las condiciones meteorológicas. De entre los dos perfiles obtenidos, el medido durante el descenso de la sonda se acercó más a los perfiles proporcionados por la bibliografía existente [117] para la época del año en la que se realizaron los ensayos (Julio de 2011).

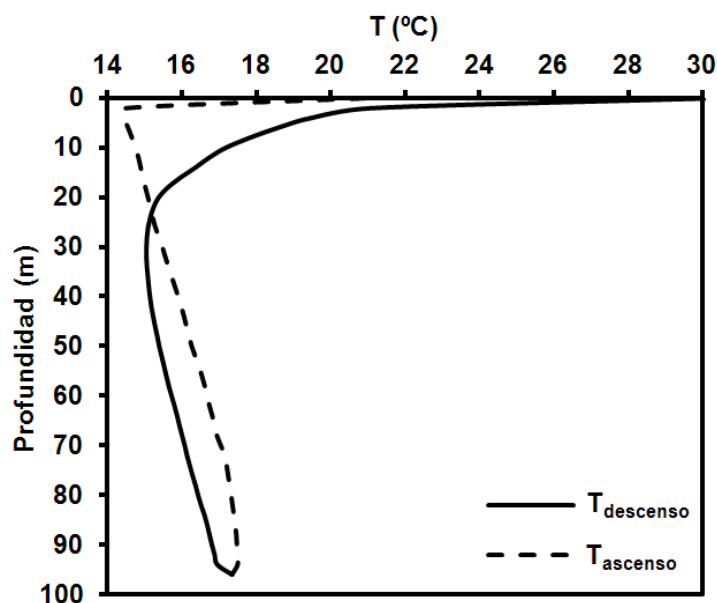


Fig. 74. Perfiles de temperatura observados en el ensayo G_3 .

La Fig. 75 muestra el perfil de temperaturas resultante de las temperaturas medias obtenidas a cada profundidad para las tres mediciones realizadas. Los tres perfiles analizados presentaron resultados similares, lo que descartó la posibilidad de que la realización de cada TRT estuviera afectada por la anterior. Por otra parte, se apreció un claro aumento lineal de la temperatura del terreno a partir de los 30 m de profundidad, lo que permitió determinar el flujo interno terrestre una vez determinada la conductividad térmica del terreno. El flujo interno terrestre se calculó a partir de la ecuación (34):

$$q_{terrestre} = \frac{\lambda_{terreno} \cdot \Delta T}{\Delta H} \quad (34)$$

Donde,

- $q_{terrestre}$ es el flujo interno terrestre (W/m^2)
- $\lambda_{terreno}$ es la conductividad térmica aparente del terreno (W/(m K))
- ΔT es el aumento de temperatura experimentado en el tramo de cálculo establecido ($^{\circ}\text{C}$)
- ΔH es el incremento de profundidad del tramo de cálculo establecido (m)

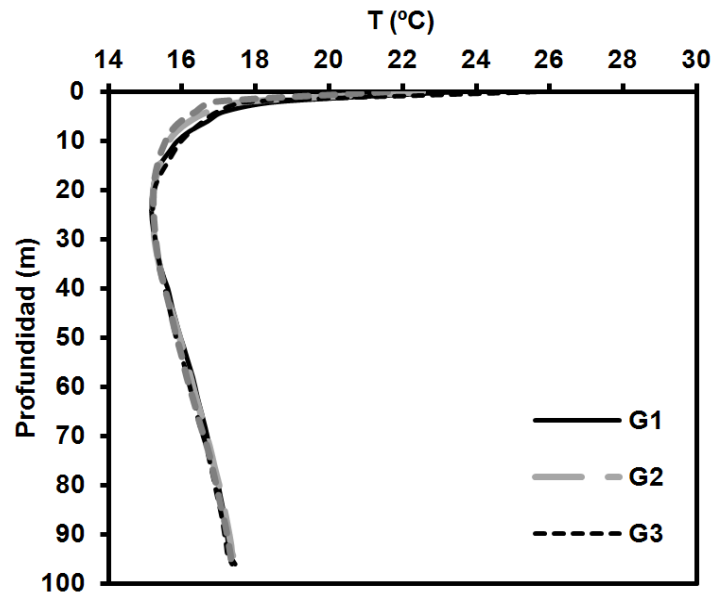


Fig. 75. Perfil de temperatura medio para cada uno de los TRTs analizados.

El gradiente térmico del terreno ($\Delta H/\Delta T$) se determinó a partir de un ajuste lineal por mínimos cuadrados de los resultados comprendidos entre los 30 m y los 90 m de profundidad. La Tabla 31 muestra el gradiente térmico, el flujo de calor interno terrestre y el coeficiente de correlación del ajuste por mínimos cuadrados realizado. El gradiente térmico de $29 \text{ m}^{\circ}\text{C}$ observado fue cercano a la media mundial estimada ($33 \text{ m}^{\circ}\text{C}$) [117].

De acuerdo a la conductividad térmica estimada en los tres ensayos tomados como válidos, en todos los casos se obtuvieron resultados similares de flujo terrestre (Tabla 31). La media de estos valores ($0,076 \text{ W/m}^2$) es un 16% inferior a la estimada a partir del atlas de recursos geotérmicos de Europa[122], que es el valor que se empleó para el dimensionamiento previo de la instalación al hacerse con el software de cálculo Earth Energy Designer (EED) [121]. En cualquier caso, el flujo interno terrestre es de mayor importancia en el caso de instalaciones con claro predominio de calefacción sobre refrigeración, que no es el caso del proyecto que enmarca esta tesis.

Tabla 31. Flujo de calor interno terrestre estimado.

TRT	$\Delta H/\Delta T$ m/°C	R ²	$q_{terrestre}$ (W/m ²)
-		-	
G ₁	29,1	0,996	0,076
G ₂	28,0	0,998	0,079
G ₃	29,9	0,998	0,074
G ₄	29,2	0,998	0,075

Para el cálculo de la resistencia térmica de la perforación fue necesario determinar la temperatura media sin perturbar del terreno. Como los perfiles representaban la temperatura existente para un intervalo de profundidad constante de 2 m, para obtener la temperatura media del terreno (T_0) bastó con calcular la media de todos los valores de temperatura obtenidos en cada perfil. En la Tabla 32 se encuentran las temperaturas medias calculadas para las 3 perforaciones analizadas. No se apreciaron diferencias significativas entre ellas, lo que indicó que el calor de hidratación del relleno fue despreciable a partir de los 14 días de curado.

Tabla 32. Temperatura media del terreno sin perturbar para cada TRT realizado.

TRT	G ₁	G ₂	G ₃
Temperatura media del terreno	16,19	16,16	16,13

4.5.2.3 Análisis de resultados de los TRTs

Los resultados obtenidos para los 3 TRTs finalmente estudiados se encuentran en el anexo de resultados A4.

La Fig. 76 muestra, a modo de ejemplo, las desviaciones de la potencia inyectada corregida (DQ*) y sin corregir (DQ) respecto a la potencia media calculada y la temperatura ambiente en todo momento para el ensayo G₃. En los ensayos se apreció una clara relación entre ambos parámetros, si bien existió un desfase de tiempo ϕ que para los ensayos G₁, G₂ y G₃ se estimó en 3,375 h, 3,625 h y 3,375 h,

respectivamente. Por otra parte, los valores de N estimados para los ensayos G_1 , G_2 y G_3 fueron de 12, 18 y 22, respectivamente, lo que indicó una menor influencia de la temperatura en la potencia inyectada en el primer ensayo.

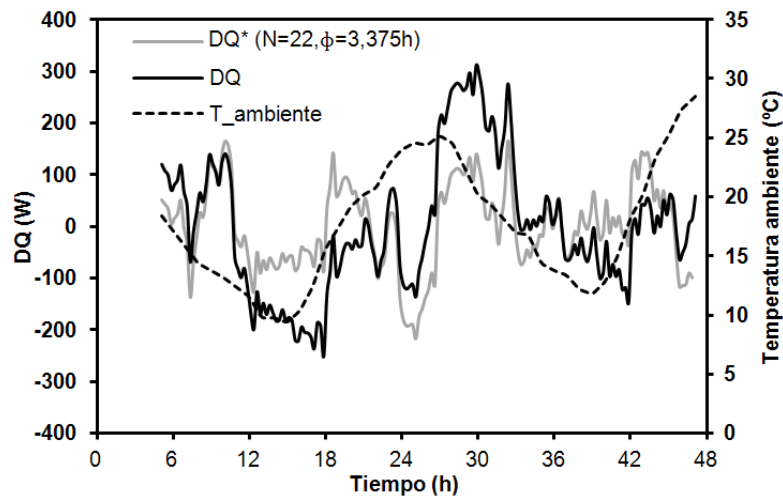


Fig. 76. Relación existente entre los residuos de la potencia térmica inyectada y la temperatura ambiente para los tres ensayos realizados. Relleno G_3 .

Pese a que se comprobó la influencia de la temperatura ambiente en la potencia térmica instantánea inyectada por el equipo, ésta se calculó a partir de la media aritmética de la potencia instantánea sin corrección ambiental alguna, ya que se trataba de la potencia que realmente se había introducido en la perforación.

Una vez determinada la potencia media del ensayo, se procedió al cálculo de los parámetros que definían las propiedades térmicas del terreno y de la perforación. Como primera aproximación al problema, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados de la curva de temperatura media del fluido portador de calor sin corrección ambiental alguna para el intervalo de tiempo máximo disponible a partir de la teoría ILS explicada. Los parámetros empleados para el ajuste así como los parámetros calculados a partir de la misma se muestran de manera resumida en la Tabla 33.

Tabla 33. Parámetros de cálculo empleados y estimación inicial para un intervalo de tiempo de 5 a 48h.

Parámetros	G_1	G_2	G_3
Potencia media del ensayo (W)	5639	5769	5592
Radio de la perforación (m)	0,06	0,06	0,06
Profundidad de la perforación (m)	97,4	97,3	96,5
Difusividad térmica (m^2/s)	1,0 e-06	1,0 e-06	1,0 e-06
Temperatura inicial del terreno ($^{\circ}C$)	16,19	16,16	16,13
Conductividad térmica del terreno (W/(m K))	2,38	2,21	2,26
Resistencia térmica de la perforación ((m K)/W)	0,0703	0,0743	0,0726

En la Fig. 77 se representan para el ensayo G_3 la temperatura media del fluido portador de calor, el residuo del ajuste realizado sobre la misma para el intervalo de 5-48h establecido y la temperatura ambiente existente en cada momento. Al observar las curvas de temperatura del fluido y de temperatura ambiente, se intuyó a simple vista una clara relación entre ambas en todos los ensayos. Sin embargo, fue a partir de la observación de las curvas de residuos y de temperatura ambiente donde se apreció mejor que esta relación era aproximadamente lineal, y que se producía con un determinado desfase de tiempo, por lo cual se planteó el análisis propuesto en la metodología.

La conductividad térmica del terreno y la resistencia térmica de la perforación se calcularon tanto para los casos en el que se aplicó la corrección propuesta ($k, \varphi \neq 0$) como para los que no ($k, \varphi = 0$). El caso en el que no se aplicó ninguna corrección sobre la temperatura del fluido portador de calor (T_f) se empleó como referencia y se comparó con el caso en el que sí se corrigió (T_{fr}). La Fig. 78 muestra las temperaturas medias del fluido portador de calor con y sin corrección. En esta curva se apreció a simple vista la corrección de las oscilaciones obtenida con el método propuesto. El desfase entre la temperatura ambiente y su influencia en el fluido portador de calor para los ensayos G_1 , G_2 y G_3 fue de 3,125h, 4,125h y 3h, respectivamente, presentando una tendencia similar a la observada en la potencia.

Según Bandos *et al.* [75], el perfil de temperaturas del terreno a partir del cual se determina la temperatura media del terreno oscila debido al cambio de temperatura ambiente con un desfase de aproximadamente 3h. En este caso, los desfases calculados fueron algo mayores debido a que al efecto de la oscilación de la temperatura del terreno se unió la inercia térmica del propio equipo de ensayo, que es desconocida. Por lo tanto, la variación de potencia experimentada fue en parte inevitable ya que se debe a la propia oscilación de temperatura del terreno ensayado.

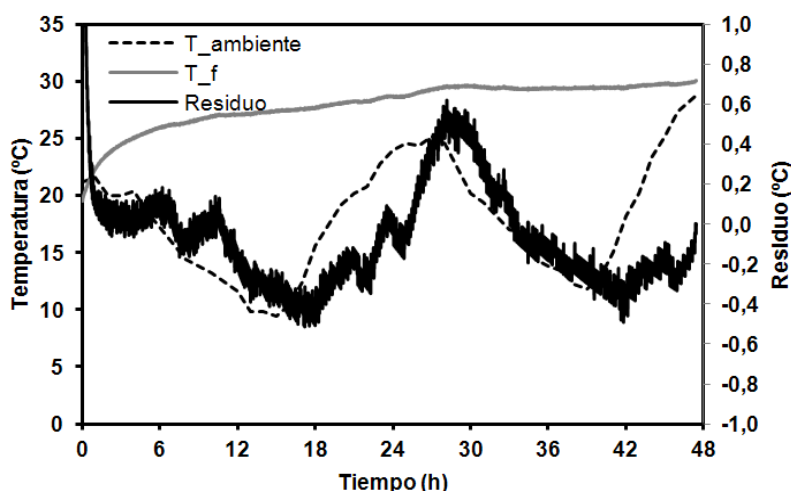


Fig. 77. Residuos del ajuste de la curva de temperatura media del fluido portador de calor para el intervalo de 5-48h y la temperatura ambiente registrada durante la realización de cada ensayo.

En cuanto al grado de afección experimentado por el ensayo, se estimaron unos valores de k de 0,050; 0,030 y 0,053 para los ensayos G_1 , G_2 y G_3 , respectivamente. Las causas por las que se produce una menor influencia del ambiente exterior en el segundo ensayo se desconocen. No obstante, se atribuyó a fenómenos meteorológicos del lugar (radiación solar, viento, humedad, etc) que no fueron incluidos como variables en la corrección propuesta.

Para confirmar la mejora de los resultados obtenidos a través de la corrección propuesta, se realizaron gráficos de probabilidad-probabilidad *lognormal* tanto de la distribución de conductividades corregidas como de las no corregidas.

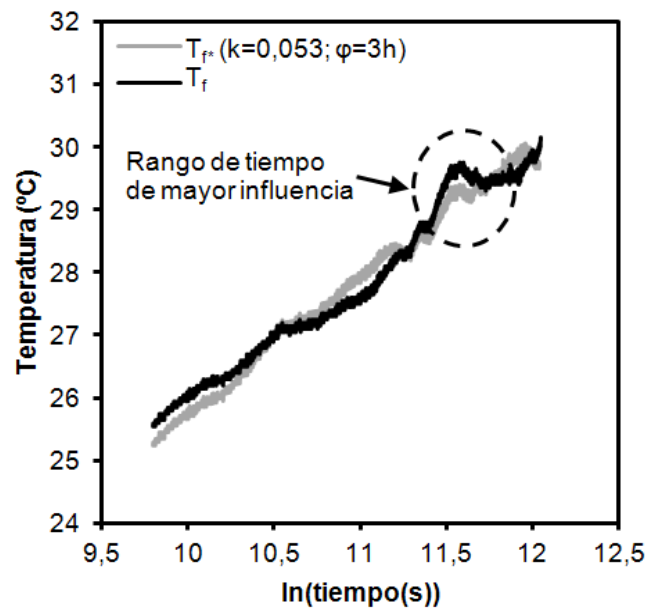


Fig. 78. Temperatura media del fluido portador de calor medida frente a la corregida.

Al tratarse de un problema transitorio, la dependencia del tiempo tanto de la conductividad térmica como de la resistencia térmica de la perforación se ajustó a una distribución *lognormal*, representada por una línea recta de 45° de inclinación en una gráfica de probabilidad-probabilidad *lognormal*. La Fig. 79 muestra como ejemplo los gráficos obtenidos para el ensayo G_3 . Para ambos parámetros se apreció cómo la corrección propuesta se ajustaba mejor a la distribución *lognormal*, como también apuntaron los coeficientes de correlación R^2 calculados para cada caso (0,946 y 0,985 para las conductividades sin corregir y corregidas; 0,967 y 0,987 para las resistencias sin corregir y corregidas, respectivamente). Todo ello indicó una mejora de la predicción realizada.

En el caso de la conductividad térmica, existen valores de la distribución no corregida que se encontraban fuera de las bandas de confianza del 5% y del 95% calculadas a partir de la distribución corregida, lo que indicó la mayor dispersión de los resultados obtenidos.

La Tabla 34 muestra los parámetros que definen la distribución de la conductividad del terreno y resistencia térmica de la perforación de los 3 ensayos realizados, tanto para el caso en el que se aplica la corrección como en el que no. La Fig. 80 muestra las conductividades y resistencias térmicas medias calculadas para cada ensayo realizado.

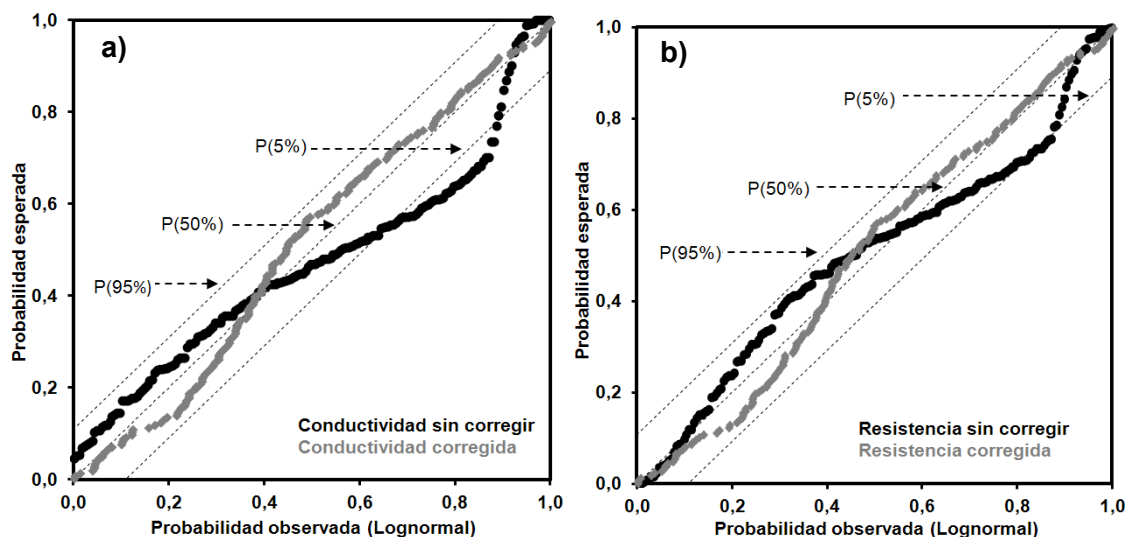


Fig. 79. Gráfico de probabilidad-probabilidad *lognormal* para a) conductividad térmica y b) resistencia térmica de la perforación calculada en el ensayo G_3 .

Tabla 34. Ajuste de los resultados de los TRTs a la distribución *lognormal*.

		Distribución lognormal				
Relleno		σ	μ	x(0,05)	x(0,5)	x(0,95)
G ₁	$\lambda_{terreno}$	0,15831	0,96	2,02	2,62	3,39
	$\lambda_{terreno} *$	0,03	0,79	2,09	2,21	2,33
	R_b	0,2288	-2,5397	0,0542	0,0789	0,1150
	$R_b *$	0,0908	-2,8210	0,0513	0,0596	0,0691
G ₂	$\lambda_{terreno}$	0,07	0,72	1,82	2,06	2,33
	$\lambda_{terreno} *$	0,01	0,76	2,10	2,15	2,19
	R_b	0,1814	-2,7725	0,0464	0,0625	0,0842
	$R_b *$	0,0270	-2,6568	0,0671	0,0702	0,0734
G ₃	$\lambda_{terreno}$	0,13	0,75	1,73	2,12	2,60
	$\lambda_{terreno} *$	0,02	0,79	2,13	2,19	2,26
	R_b	0,2667	-2,8082	0,0389	0,0603	0,0935
	$R_b *$	0,0387	-2,6831	0,0641	0,0684	0,0728

*Se aplica la corrección de temperatura ambiente

El terreno era el mismo para los 3 ensayos realizados, por lo que la conductividad térmica del terreno estimada tenía que ser similar en todos ellos. De acuerdo a la media calculada para los datos sin corregir, se podría haber afirmado que la conductividad térmica del ensayo G_1 era mayor que la de los ensayos G_2 y G_3 . Sin embargo, los valores estimados mediante la corrección propuesta indicaron que la conductividad fue similar en todos los casos, con un valor medio de 2,18 W/(m K).

Para el cálculo de la resistencia térmica es necesario conocer la conductividad térmica del terreno, lo que implica que la corrección propuesta cambie de manera significativa la resistencia térmica estimada en el ensayo G_1 . El terreno y la configuración de los intercambiadores ensayados fue similar en todos los casos salvo por el tipo de relleno empleado. Por lo tanto, la resistencia térmica de la perforación depende de las propiedades térmicas del relleno y de cómo éste ha rellenado los huecos dentro de la perforación.

Tal y como se ha dicho en la metodología, era de esperar que un aumento de la conductividad térmica del relleno implicara una reducción de la resistencia térmica de la perforación. Sin embargo, los datos corregidos determinaron que el relleno que menor resistencia térmica ofreció fue precisamente el que menor conductividad térmica presentó en laboratorio, lo que contradijo a todas las formulaciones propuestas hasta el momento. La Tabla 35 muestra las conductividades térmicas de los rellenos estimadas a partir del software EED y las conductividades medidas en laboratorio tanto para los rellenos recogidos en obra como para los confeccionados en laboratorio. Como puede observarse, la conductividad térmica del relleno estimada en los ensayos G_1 y G_2 fue superior a la medida tanto en las probetas de obra como en las de laboratorio mientras que para la G_3 ocurrió lo contrario.

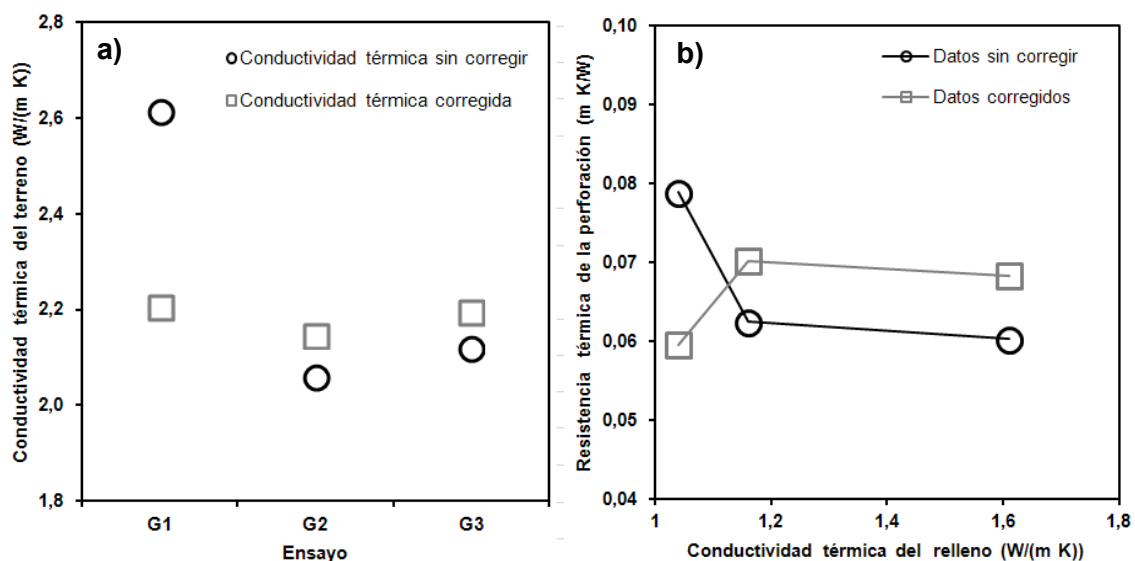


Fig. 80. Propiedades térmicas del intercambiador: a) conductividad térmica y b) resistencia térmica de la perforación frente a conductividad térmica saturada del relleno en laboratorio.

Tabla 35. Conductividad térmica del relleno medida en laboratorio y estimada a partir del software EED.

		Conductividad térmica ($W/(m K)$)		
		Laboratorio	Obra	EED
Relleno	G_1	1,04	1,02	1,90
	G_2	1,16	1,07	1,42
	G_3	1,61	2,02	1,49

Las diferencias observadas entre los datos obtenidos en laboratorio y lo reflejado en campo imposibilitaron cualquier conclusión acerca de la influencia del relleno empleado en la eficiencia térmica de la instalación. Las diferencias observadas pudieron deberse fundamentalmente a tres razones fundamentales que se detallan a continuación.

En primer lugar, existió una falta de control de posicionamiento de las sondas dentro de la perforación. La Fig. 81 muestra la sección transversal de los intercambiadores empleados y las incertidumbres que no fueron controladas debido al procedimiento constructivo empleado. La separación entre las 4 tuberías que conforman la sonda de doble U se acometió únicamente mediante su unión al tubo central de inyección empleado. Por lo tanto, la separación mínima entre tubos fue de 64 mm. Sin embargo, existió la posibilidad de que se separaran entre sí por la ruptura de la cinta empleada para su unión. Además, tampoco se controló la ubicación del sistema de sondas completo dentro de la perforación, que pudo tender a apoyarse en las paredes de la misma por pandeo de las sondas. Como la sonda se dispone enrollada, y pese al lastre añadido, aún pudo mantener una curvatura que la empujara al lateral de la perforación. Todo ello supuso una incertidumbre adicional desconocida.

En segundo lugar, pese a que se encamisó toda la perforación y no se retiró la misma hasta el momento en el que se procedió al relleno del intercambiador, uno de los intercambiadores no se pudo rellenar debido al colapso de las paredes de la perforación. Así, aunque este intercambiador no fue analizado era de esperar que en el resto de las perforaciones se hubieran producido colapsos del terreno que si bien fueron evitados en parte por el relleno inyectado, provocaran la mezcla del mismo con el terreno. La Fig. 82a muestra un esquema de la situación del relleno inyectado en un terreno con tendencia al colapso. Como se puede observar, el relleno presente en la perforación puede ser en realidad una mezcla del relleno inyectado y el terreno colapsado, lo que explicaría las mejoras de conductividad térmica observadas en los rellenos G_1 y G_2 .

Por último, durante la inyección de los rellenos G_2 y G_3 se produjo segregación, por lo que la proporción de árido respecto al cemento del relleno una vez endurecido presente en el intercambiador aumenta a medida que aumenta la profundidad de la perforación. La Fig. 82b muestra un esquema de la influencia de la segregación en la conductividad térmica del relleno presente a diferentes profundidades. Cuanto mayor es la proporción de árido que contiene el relleno, mayor es también su conductividad térmica efectiva. Como consecuencia, la conductividad térmica de los rellenos segregados aumentará con la profundidad de la perforación. Sin embargo, la ganancia de conductividad térmica en profundidad no tiene por qué compensar la pérdida de la misma en la zona superficial, lo que podría explicar la menor conductividad térmica obtenida para el relleno G_3 .

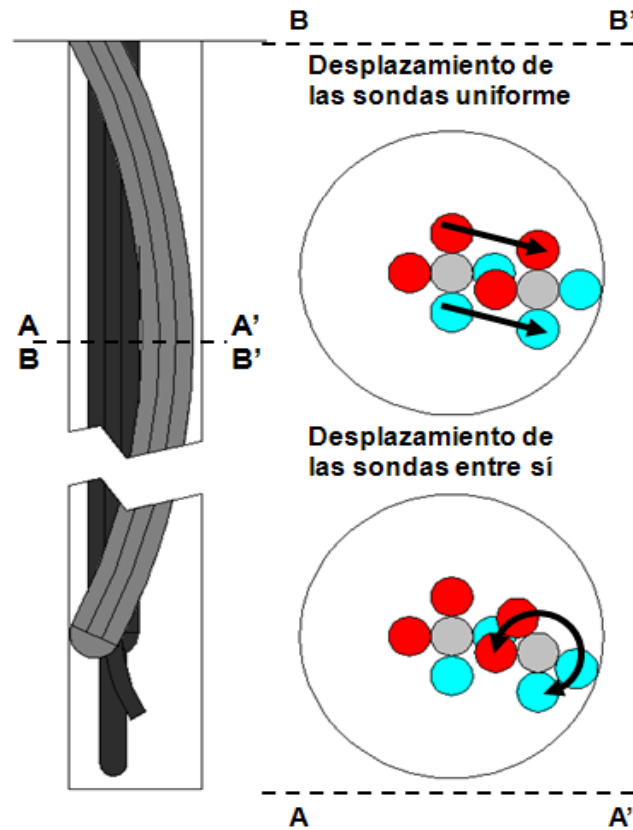


Fig. 81. Situación de las sondas dentro de la perforación geotérmica.

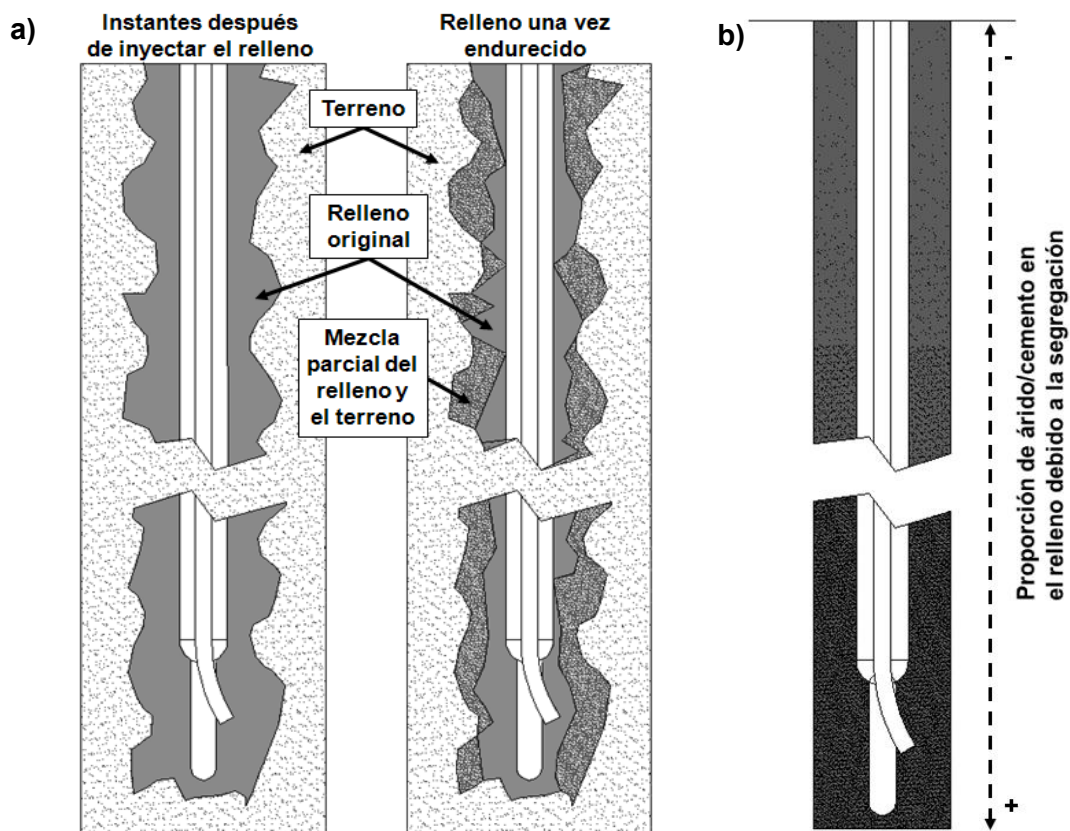


Fig. 82. Situación del relleno en la perforación: a) mezcla parcial del relleno con el terreno por la tendencia al colapso del mismo y b) variación de la proporción de árido resultante a lo largo de la perforación debido a la segregación experimentada por el relleno.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

En esta tesis se analizó la posibilidad de uso de diferentes áridos naturales y reciclados para la fabricación de morteros autocompactantes utilizados como rellenos de perforaciones geotérmicas.

Para ello, en primer lugar se realizó un análisis en laboratorio que permitió determinar la influencia del tipo y proporción de árido empleado en las características físicas y mecánicas del relleno geotérmico resultante. Basados en las dosificaciones óptimas calculadas en ese estudio, se analizó la influencia en las mismas propiedades físicas, térmicas y resistentes de los ciclos térmicos de hielo-deshielo a los que puede verse sometido el relleno debido al funcionamiento de una instalación geotérmica durante los picos de carga invernales.

Por último, se analizó la influencia real del tipo de relleno empleado en intercambiadores de calor reales a partir de la realización de Tests de Respuesta Térmica (TRT).

5.1.1 INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS

En este apartado se analizó la influencia del tipo y proporción de árido empleado en la conductividad térmica de los morteros resultantes. Para ello, se fabricaron morteros con tres proporciones diferentes de arena caliza (C), sílicea (S), escoria de acería de arco eléctrico (EAE) y residuos de construcción y demolición (RCD). Las conclusiones a las que se llegó se exponen a continuación:

- Los áridos utilizados permitieron la confección de morteros autocompactantes siempre y cuando la relación máxima de árido respecto al cemento en peso empleada no fuera mayor a 3.
- El rango de consistencia de 260-300 mm establecido en la mesa de sacudidas fue válido para asegurar la autocompactabilidad de la mezcla. Este hecho se comprobó durante el llenado de los moldes, al haberse rellenado los moldes de densidad aparente en fresco sin necesidad de compactación. Sin embargo, se detectó la presencia de aire ocluido en las probetas endurecidas, probablemente debido a la falta de peso propio de autocompactación del mortero, lo que será necesario analizar en futuros estudios.
- Los morteros diseñados permitieron extraer los lodos de perforación empleados dado que las densidades en fresco medidas son significativamente mayores a las de los lodos más habituales.

- La densidad de partículas del árido y su proporción de uso fueron los factores más determinantes en la densidad aparente del mortero en fresco y endurecido.
- La absorción de agua del árido y su proporción de uso fueron los factores que más influyeron sobre la relación agua-cemento requerida por la mezcla.
- Las resistencias a compresión de todas las dosificaciones propuestas cumplieron con la resistencia mínima de 15 MPa establecida por la instrucción *EHE08* para hormigones no estructurales. Esto abre la posibilidad de analizar su uso como hormigón estructural en cimentaciones activadas térmicamente, si bien para ello es necesario realizar un estudio que se encuentra fuera de los objetivos planteados en esta tesis.
- Tanto el tipo de árido como su proporción de uso influyeron de manera significativa en la conductividad térmica resultante del mortero:
 - o La inclusión de cualquiera de los áridos analizados al mortero aumentó la conductividad térmica del mismo, independientemente de las proporciones empleadas, dado que la conductividad térmica de las partículas del árido fue en todo momento superior a la de la lechada de cemento tomada como referencia.
 - o Para proporciones en peso de árido respecto al cemento superiores a 2, no se observó un aumento significativo de la conductividad térmica del mortero para ninguno de los áridos propuestos. En el caso del RCD, el valor decreció notablemente, por lo que no se aconseja el uso de esta dosificación.
- Los valores de resistencia, porosidad accesible y conductividad térmica obtenidos indican que, de todas las dosificaciones analizadas, la mejor opción en todos los casos fue emplear la relación de árido cemento en peso de 2. Estas dosificaciones se emplearon para el análisis de durabilidad frente a ciclos de hielo-deshielo realizado.

5.1.2 DURABILIDAD DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO

En este apartado se analizó la influencia de los ciclos térmicos de hielo-deshielo en las propiedades mecánicas y térmicas de los morteros geotérmicos de base cemento. Partiendo de las dosificaciones óptimas determinadas previamente, se analizó la influencia del tiempo de curado de las probetas sumergidas en agua y del daño del mortero debido a la acción de los ciclos de hielo-deshielo realizados. Las metodologías existentes para la aplicación de ciclos de hielo-deshielo en hormigones o morteros no se ajustaban a las condiciones especiales a las que se expone el relleno geotérmico, por lo que se aumentaron los tiempos de exposición en cada caso. Las conclusiones obtenidas se presentan a continuación:

- El contenido volumétrico de agua de las probetas se debió en gran medida al propio agua de amasado empleada, lo que a su vez produjo una reducción de la resistencia mecánica del mortero.
- La metodología propuesta en este trabajo para la realización de daño por ciclos de hielo-deshielo no dañó los rellenos propuestos de manera significativa. Esto se debió a que las probetas no alcanzaron el grado de saturación crítico para las condiciones de saturación aplicadas.
- A excepción de la lechada empleada como referencia, ningún otro mortero presentó influencia del tiempo de curado ni de la aplicación de ciclos de hielo-deshielo en los resultados de resistencia a flexión y a compresión simple. En esos casos, las diferencias observadas en los resultados se atribuyeron a la propia incertidumbre del propio ensayo.
- La resistencia de adherencia mejoró con la edad de curado del mortero, disminuyendo tras la ejecución de los ciclos de hielo-deshielo. Sin embargo, habría que realizar un mayor número de ensayos para confirmar estos resultados.
- El tiempo de curado y los ciclos de hielo-deshielo realizados no influyeron en la conductividad térmica de la matriz del mortero en ningún caso. El deterioro observado en las probetas del mortero de lechada indica que cualquier disminución de la eficiencia térmica de la perforación se debió a la aparición de resistencias de contacto térmicas en las fracturas generadas por los ciclos térmicos realizados.

5.1.3 INFLUENCIA DEL RELLENO EMPLEADO EN LA EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO

En este capítulo se analizó la puesta en obra de los rellenos diseñados previamente en laboratorio. Debido a la indisponibilidad de algunos áridos, se debieron modificar las dosificaciones inicialmente propuestas, lo que resultó en la inyección de cuatro rellenos diferentes. Uno de los rellenos se sustituyó por uno comercial basado principalmente en bentonita y mejorado térmicamente con adiciones de grafito, cemento y arena silícea (G_1). A los otros tres morteros de cemento con RCD (G_2), arena silícea (G_3) y escoria de acería LD (G_4) se les añadió bentonita y retardante de fraguado para reducir la segregación del relleno durante su inyección. Una vez terminada la construcción de los intercambiadores, y tras esperar 14 días para que desapareciera cualquier influencia del fraguado y endurecimiento de los rellenos, se realizaron cuatro TRTs con el objetivo de determinar tanto la conductividad térmica del terreno como la influencia del relleno en la resistencia térmica de la perforación, que son los parámetros fundamentales a la hora de diseñar un sistema geotérmico. Sin embargo, el TRT realizado sobre el relleno G_4 debió descartarse por una tormenta que alteró los resultados obtenidos. En base a la metodología llevada a cabo y a los resultados obtenidos, se concluyó que:

- Durante la inyección de los rellenos, estos sufrieron segregación debido al tipo de amasadora empleado y a los rellenos de mortero de alto contenido de árido utilizados. Durante los ensayos realizados en laboratorio se comprobó que la segregación pudo haberse evitado empleando una hormigonera de eje basculante.
- El método propuesto de corrección de la influencia de la temperatura ambiente en los resultados obtenidos por el ensayo aumentó de manera significativa la precisión de la estimación tanto de la conductividad térmica del terreno como de la resistencia térmica de la perforación.
- La conductividad térmica del terreno depende del intervalo de tiempo escogido, lo que a su vez influyó en la resistencia térmica de la perforación estimada. La distribución resultante de evaluar ambas variables según diferentes intervalos de tiempo se ajustó a una distribución *lognormal* de 2 parámetros.
- Los rellenos empleados en obra resultan válidos para su uso en obras futuras, si bien se deben realizar cambios en el proceso de inyección. Sin embargo, no se recomienda el uso del relleno con escorias debido a que sus propiedades térmicas no mejoraron las de los rellenos existentes y a que, además, presentó mayores problemas de segregación e inyección. La elección del relleno óptimo dependerá de la conductividad térmica del terreno existente en cada caso.

- En contra de lo que sugiere Chulo Lee [72], y tal y como predice la teoría de fuente lineal infinita empleada, la conductividad térmica del terreno predicha no depende de la configuración del intercambiador vertical ensayado, dado que para resistencias de perforación diferentes se determinó una conductividad térmica del terreno similar.
- Debido a la naturaleza colapsable del terreno y a la falta de control de posición de las sondas, no se pudo analizar la influencia real del relleno en la eficiencia de los intercambiadores térmicos estudiados a partir de los ensayos realizados in situ. Sin embargo, en todos los ensayos realizados se obtuvo una resistencia térmica menor a la esperada, lo que indica la mejora de conductividad del relleno efectivo proporcionada por la mezcla del propio terreno con el relleno inyectado.

5.2 RECOMENDACIONES FUTURAS

A partir del análisis de los resultados obtenidos en esta tesis, se comprobó que la metodología de ejecución de ciclos hielo-deshielo empleada no ejerció el daño perseguido debido a dos factores fundamentales.

En primer lugar, las probetas en su interior no se encontraban totalmente saturadas debido a que su exposición al agua se realizó únicamente por inmersión en la misma. Para asegurar la saturación del mortero, se recomienda someter a las probetas a presiones de confinamiento superiores cercanas a las existentes en lo más profundo de la perforación. Para ello, se propone construir un recipiente que permita aplicar una sobrepresión al agua en la que se encuentran las probetas sumergidas. También puede contemplarse la aplicación de vacío para el mismo propósito.

En segundo lugar, en una instalación real en la que no se limita la temperatura del fluido portador de calor, el daño por congelación proviene del interior del relleno. Por ello, se propone aplicar el cambio térmico necesario en los ciclos de hielo-deshielo a partir de tubos embebidos previamente en la probeta, formando un circuito embebido por el relleno que a posteriori pueda ser dividido en las probetas deseadas.

Por otra parte, a lo largo de la investigación se han recopilado una serie de propuestas de mejora que deberían tenerse en cuenta en futuros proyectos:

- No se recomienda añadir bentonita a los morteros geotérmicos de alto contenido en árido, ya que reducen de manera significativa sus propiedades térmicas y resistentes.
- Se recomienda emplear la máxima proporción de árido posible en los morteros geotérmicos siempre y cuando se eviten los problemas de segregación y no existan problemas de bombeo.
- La proporción de agua respecto al cemento debe ser la mínima posible que permita confeccionar un relleno autocompactante, ya que su aumento reduce sus propiedades térmicas, resistentes y adherentes.
- La amasadora de lechadas de bentonita de la que disponen las constructoras de instalaciones geotérmicas emplean un mecanismo de mezcla inadecuado para estos rellenos, lo que provoca segregación y disminuye la calidad y fiabilidad del relleno inyectado. Para evitar este problema en la inyección de rellenos geotérmicos de alto contenido de árido como los analizados en esta tesis, se recomienda emplear una amasadora de hormigón de eje basculante convencional. Sin embargo, sería necesario verter el material fabricado con esta amasadora a la inyectora, para lo cual se propone una disposición de equipos similar a la que se muestra en la Fig. 83.

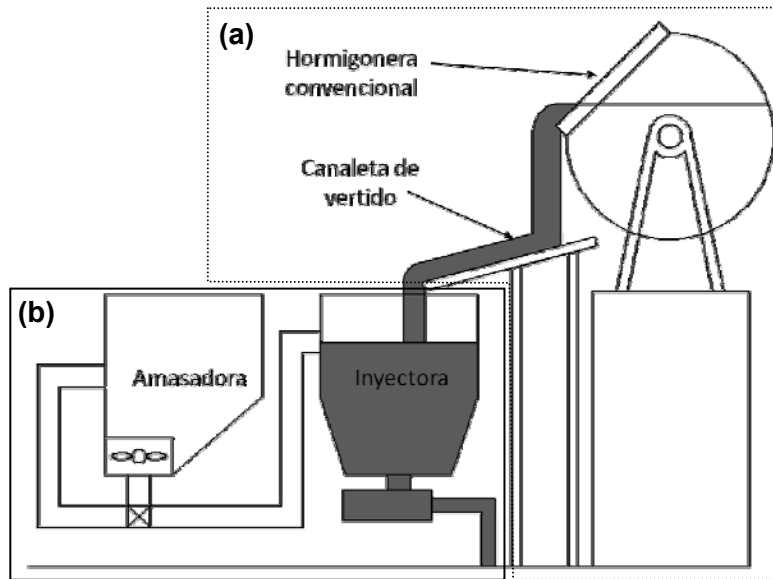


Fig. 83. Instalación necesaria para la superposición entre la amasadora de hormigón de eje basculante (a) y la amasadora-inyectora normalmente empleada (b) en proyectos de geotermia.

- Para futuros proyectos, y solamente con fines de investigación, se recomienda colocar en terrenos colapsables un encamisado permanente que permita separar de manera efectiva el relleno del terreno. De esa manera se evitaría la mezcla del relleno con el terreno colapsado, lo que disminuiría las diferencias de resistencia térmica atribuibles al relleno que dificultan su análisis.
- Para aumentar la eficiencia de la instalación se recomienda usar como separador de los 4 tubos una tubería de inyección del mayor diámetro posible, o una sección de tubería auxiliar que haga de separador. Esto permitirá facilitar el bombeo e inyección del relleno, pero además reduciría la interferencia térmica entre los tubos. Para evitar su movimiento alrededor del tubo de inyección (ver Fig. 81) se recomienda emplear sujeciones tal y como se muestra en la Fig. 84.

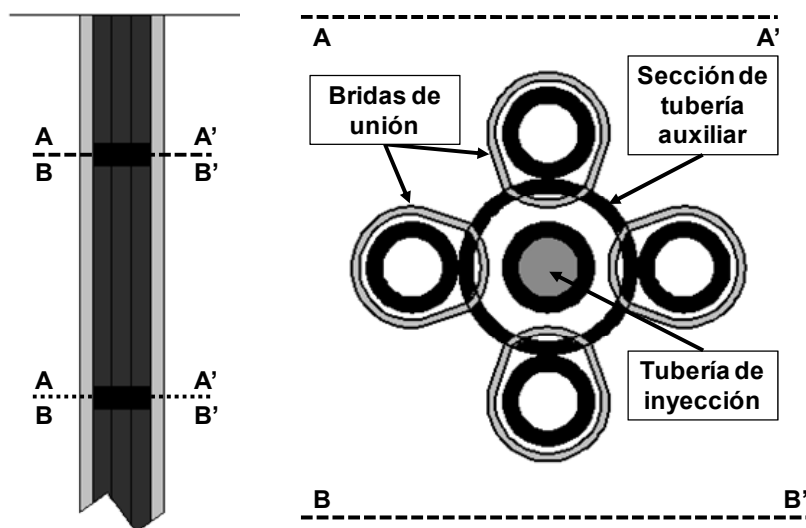


Fig. 84. Colocación de bridas para asegurar la correcta separación entre las sondas.

5.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las futuras líneas de investigación derivadas de esta tesis se dividen en cuatro apartados principales:

- Propuestas de mejora sobre los materiales de relleno.
- Mejoras sobre el procedimiento de inyección empleado.
- Posibles nuevas aplicaciones y metodologías para la realización de TRTs
- Utilización de los rellenos para otros tipos de intercambio de energía.

La primera serie de propuestas tratan de mejorar las prestaciones térmicas del relleno geotérmico a partir de la incorporación de nuevos materiales. La segunda línea de investigación, en cambio, se centra en posibles mejoras tanto del relleno como de otros componentes de la instalación que faciliten el procedimiento constructivo y permitan tanto un aumento de la eficiencia de la instalación como la reducción de los costes de construcción.

En primer lugar, se debe estudiar la influencia que tiene la alta presión hidrostática a la que está expuesto el relleno en lo más profundo de la perforación en las propiedades térmicas, hidráulicas y resistentes del mismo. Para su análisis en laboratorio se requiere de un equipo que permita aplicar grandes presiones (del orden de 1 MPa) a las probetas sumergidas en agua a una temperatura que se encuentre dentro del rango de funcionamiento de la instalación geotérmica (0-40°C).

En segundo lugar, se debe analizar la posibilidad de mejorar térmicamente los morteros mediante la adición de grafito en diferentes formas, como ya se ha realizado en el caso de los rellenos basados en bentonita [35]. A su vez, se propone aumentar las prestaciones térmicas del cemento empleando carburo de silicio como adición, o la mejora de la conductividad térmica del relleno mediante la saturación previa a alta presión del árido empleado.

En tercer lugar, se debe investigar con mayor profundidad el procedimiento de inyección de los rellenos geotérmicos centrándose en sus propiedades reológicas, ya que los rellenos empleados en la actualidad son excesivamente fluidos. Se deben determinar las propiedades reológicas críticas que permitan confeccionar un relleno bombeable minimizando la cantidad de agua empleada en la mezcla. En esta tesis se define la autocompactabilidad de manera similar al caso de los hormigones. Sin embargo, los rellenos geotérmicos podrían ser autocompactantes para consistencias más plásticas, ya que el propio peso de la columna de relleno proporciona una mayor energía de compactación. Esto debería ser estudiado con mayor detenimiento.

Por otra parte, también existen posibilidades de mejorar el tubo de inyección empleado. En esta línea, cabe resaltar el diseño de una sonda de inyección que

permita detectar el correcto llenado de la perforación hasta la boca de salida del inyector. De esta manera, se podría ir ascendiendo el tubo de inyección, asegurando un mejor relleno de la perforación que con el método actual. Para completar el diseño del tubo de inyección, se propone a su vez diseñar un frente de inyección que permita vibrar el relleno ya inyectado, lo que permitiría bombear rellenos con menor proporción de agua, mejorando sus propiedades térmicas y resistentes y reduciendo su permeabilidad.

En cuanto a los tests de respuesta térmica (TRT), se plantea la realización de ensayos en diferentes cimentaciones activas, para lo cual es necesario estudiar la metodología de análisis de los resultados obtenidos en cada caso en función de la geometría de la propia cimentación ensayada. Además, se propone el estudio del comportamiento del terreno bajo cargas térmicas cíclicas como método de mejora de la eficiencia de un intercambiador térmico. Para ello, sería necesario el diseño de un TRT que permitiera la aplicación de diferentes ciclos de carga, a partir de los cuales se analizaría la influencia del ciclo de calor inyectado en las curvas de temperatura del fluido resultante.

Por otra parte, Raymond *et al.* [119] abrieron la posibilidad de realizar el TRT sin necesidad de recircular el fluido, para lo cual propusieron la introducción de un cable-resistencia eléctrica en una de las tuberías que permitiera aportar un calor constante por unidad de longitud. Basados en su procedimiento de ensayo, y mediante la introducción de cables sensores de temperatura en otras tuberías de la misma perforación, se plantea la caracterización térmica del relleno a lo largo de la perforación, lo que permitiría la detección de posibles discontinuidades en el mismo y por lo tanto la realización de un control de calidad de la inyección realizada.

Por último, los morteros autocompactantes analizados se podrían emplear para otras aplicaciones: sustituto del hormigón estructural en pilotes térmicamente activados, en pavimentos de aparcamientos para captación de energía solar térmica o incluso como relleno en bulones para su posible activación térmica. Para todos estos casos, es necesario comprobar el cumplimiento de la normativa vigente.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Geológico y Minero de España, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Manual de geotermia. Madrid IDAE, 2008.
- [2] Llopis Trillo G, Rodrigo Angulo V. Guía de la Energía Geotérmica. 1ª edición Madrid, Comunidad de Madrid: 2008.
- [3] Mustafa Omer A. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:344-71.
- [4] Unión Europea. Directiva 2009/28/CE: Fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, 2009.
- [5] Eurobserv'ER. The State of Renewable Energies in Europe. *11Th Eurobserv'ER Report* 2011.
- [6] Pérez D, Aceves C. Análisis de la bomba de calor geotérmica en el panorama energético español. *II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria* (ISBN: 978-84-613-8588-1) 2010;151-8.
- [7] Smith MD, Perry RL. Borehole grouting: field studies and thermal performance testing. *ASHRAE Transactions* 1999; 105:451-57.
- [8] Fernández A, Sanner B, Gieb C, Novelle L. Influencia del tipo de relleno del sondeo en la eficiencia del campo de captación geotérmico, *Ingeoprés* 2010; 189:62-5.
- [9] International Geothermal Association. http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/what_is_geothermal_energy.html; 2013.
- [10] Hammons TJ. Geothermal power generation worldwide: Global perspective, technology, field experience, and research and development. *Electric Power Components and Systems* 2004; 32:529-53.
- [11] Creus Solé A. Energía geotérmica de baja temperatura. 1ª edición. Ceysa editorial técnica, 2008.
- [12] Florides G, Kalogirou S. Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. *Renewable Energy* 2007; 32:2461-78.
- [13] Phetteplace G. Geothermal heat pumps. *Journal of Energy Engineering* 2007; 133:32-8.
- [14] Ruiz V, Linares JI, Zamora M, Arenas A. La piscina como foco exterior en una bomba de calor geotérmica para vivienda unifamiliar en España. Comparativa con sistemas convencionales. *I Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria- Geoener* 2008; ISBN: 978-84-612-6737-8; 433-42.
- [15] Pinuaga JI, García de la Noceda, C. Los recursos geotérmicos convencionales en la legislación española. *I Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria- Geoener* 2008; ISBN: 978-84-612-6737-8; 609.

- [16] Pinuaga JI, Uría AF. Protección de los aprovechamientos de recursos geotérmicos y aguas termales y su compatibilidad con otros de carácter minero. *II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria* 2010; ISBN: 978-84-613-8588-1; 515.
- [17] Pérez-Paricio A. Implantación de sistemas geotérmicos de baja energía en las cuencas internas de Cataluña; rol actual de la Agencia Catalana del Agua y propuestas de futuro. *II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria* 2010; ISBN: 978-84-613-8588-1;529.
- [18] Piechowski M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: Theoretical development. *International Journal of Energy Research* 1999; 23:571-88.
- [19] Inalli M, Esen H. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system. *Applied Thermal Engineering* 2004; 24:2219-32.
- [20] Inalli M, Esen H. Seasonal cooling performance of a ground-coupled heat pump system in a hot and arid climate. *Renewable Energy* 2005; 30:1411-24.
- [21] Esen H, Inalli M, Esen M. Numerical and experimental analysis of a horizontal ground-coupled heat pump system. *Building and Environment* 2007; 42:1126-34.
- [22] Esen H, Inalli M, Esen M, Pihtili K. Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers. *Building and Environment* 2007; 42:3606-15.
- [23] Pulat E, Coskun S, Unlu K, Yamankaradeniz N. Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. *Energy* 2009; 34:1284-95.
- [24] Tarnawski VR, Leong WH, Momose T, Hamada Y. Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan. *Renewable Energy* 2009; 34:127-34.
- [25] Hamada Y, Nakamura M, Saitoh H, Kubota H, Ochifuji K. Improved underground heat exchanger by using no-dig method for space heating and cooling. *Renewable Energy* 2007; 32:480-95.
- [26] Gan G, Riffat SB, Chong CSA. A novel rainwater-ground source heat pump - Measurement and simulation. *Applied Thermal Engineering* 2007; 27:430-41.
- [27] VDI 4640. Thermal use of the Undreground: Fundamentals, approvals, environmental aspects. 2000.
- [28] Zeng H, Diao N, Fang Z. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2003; 46:4467-81.

- [29] Shu H, Duanmu L, Hua R. Analysis of Selection of Single or Double U-bend Pipes in a Ground Source Heat Pump System. *Renewable Energy Resources and a Greener Future* 2006.
- [30] International ground source heat pump association (IGSHPA). Design and Installation Standards. Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems 2011.
- [31] Lee C, Lee K, Choi H, Choi H-. Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea. *Science China-Technological Sciences* 2010; 53:123-8.
- [32] Remund CP, Lund JT. Thermal enhancement of bentonite grouts for vertical GSHP systems. *ASME - American Society of Mechanical Engineers, Advanced Energy Systems Division (Publication)* 1993; 29:95-106.
- [33] Remund CP. Grouting for vertical GHP systems: Engineering design and field procedures manual. *Electric Power Research Institute EPRI* 1997; TR-109169.
- [34] Carlson SW. GSHP bore field performance comparisons of standard and thermally enhanced grout. *ASHRAE Transactions* 2000; 106.
- [35] Delaleux F, Py X, Olives R, Dominguez A. Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. *Applied Thermal Engineering* 2012; 33-34:92-9.
- [36] Jobmann M, Buntebarth G. Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste. *Applied Clay Science* 2009; 44:206-10.
- [37] Allan M. Geothermal heat pump grouting materials. *Progress Report, BNL-65676 CONF-980441*. 1998.
- [38] Allan ML, Philippacopoulos AJ. Thermally conductive cementitious grouts for geothermal heat pumps. *FY 1998 Progress Report, BNL 66103* 1998:395.
- [39] Allan ML, Kavanaugh SP. Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps. *HVAC and R Research* 1999; 5:87-98.
- [40] Allan ML, Philippacopoulos AJ. Properties and Performance of Cement-Based Grouts for Geothermal Heat Pump Applications. *Final Report* 1999.
- [41] Allan ML, Philippacopoulos AJ. Ground water protection issues with geothermal heat pumps. *Transaction of the Geothermal Resources Council* 1999; 23:101-5.
- [42] Allan ML. Materials characterization of superplasticized cement-sand grout. *Cement and Concrete Research* 2000; 30:937-42.

- [43] Allan ML, Philippacopoulos AJ. Performance Characteristics and Modelling of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps. *Proceedings World Geothermal Congress*. Kyushu - Tohoku, Japan. 2000: 3355-60.
- [44] Allan ML, Kavanaugh SP. Thermal conductivity of cementitious grouts and impact on heat exchanger length design for ground source heat pumps. *ASHRAE Transactions* 2000; 106.
- [45] Allan M. Thermal Conductivity of Cementitious Grouts for Geothermal Heat Pumps: *FY 1997 Progress Report*. 1997: 65:129.
- [46] Philippacopoulos AJ, Berndt ML. Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. *Geothermics* 2001; 30:527-45.
- [47] Fu X, Chung DDL. Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste. *Cement and Concrete Research* 1997; 27:1799-804.
- [48] Xu Y, Chung DDL. Cement of high specific heat and high thermal conductivity, obtained by using silane and silica fume as admixtures. *Cement and Concrete Research* 2000; 30:1175-8.
- [49] Xu Y, Chung DDL. Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. *Cement and Concrete Research* 2000; 30:59-61.
- [50] Demirboğa R. Thermo-mechanical properties of sand and high volume mineral admixtures. *Energy and Buildings* 2003; 35:435-9.
- [51] Uysal H, Demirboga R, Şahin R, Gül R. The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete. *Cement and Concrete Research* 2004; 34:845-8.
- [52] Bentz DP. Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes. *Materials and Structures* 2007; 40:1073-80.
- [53] Bentz DP, Peltz MA, Durán-Herrera A, Valdez P, Juárez CA. Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics* 2011; 34:263-75.
- [54] Alani A, MacMullen J, Telik O, Zhang ZY. Investigation into the thermal performance of recycled glass screed for construction purposes. *Construction and Building Materials* 2012; 29:527-32.
- [55] Alonso-Sánchez T, Rey-Ronco MA, Carnero-Rodríguez FJ, Castro-García MP. 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* 2012; 37:226-34.

- [56] Rey-Ronco MA, Alonso-Sánchez T, Coppen-Rodríguez J, Castro-García MP. A thermal model and experimental procedure for a point-source approach to determining the thermal properties of drill cuttings. *Journal of Mathematical Chemistry* 2013; 51:1139-52.
- [57] Bandos TV, Montero Á, Fernández de Córdoba P, Urchueguía JF. Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: Effect of ambient air temperature variations. *Geothermics* 2011; 40:136-43.
- [58] Fujii H, Okubo H, Nishi K, Itoi R, Ohyama K, Shibata K. An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. *Geothermics* 2009; 38:399-406.
- [59] Witte HJL, Van Gelder GJ, Spitler JD. In situ measurement of ground thermal conductivity: A dutch perspective. *ASHRAE Transactions* 2002; 108(1):263-72.
- [60] Wang H, Qi C, Du H, Gu J. Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system. *Renewable Energy* 2010; 35:727-33.
- [61] Rainieri S, Bozzoli F, Pagliarini G. Modeling approaches applied to the thermal response test: A critical review of the literature. *HVAC and R Research* 2011; 17:6:977-90.
- [62] Carslaw HS, Jaeger JC. Conduction of heat in solids. Oxford University press, New York 1959:510.
- [63] Mogensen P. Fluid to duct wall heat transfer in duct heat storages. *Proceedings of the international conference on subsurface heat storage in theory and practice. Swedish Council for Building Research* 1983:652-7.
- [64] Kavanaugh SP, Rafferty K. Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Industrial Buildings. Atlanta, GA: ASHRAE, 1997.
- [65] Beck JV, Shonder JA. Parameter estimation technique for determining soil thermal properties in the design of heat exchangers for geothermal heat pumps. *ASME Heat Transfer Division Publication HTD* 1998; 361-3:221-40.
- [66] Shonder JA, Beck JV. Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique. *ASHRAE Transactions* 1999; 105(1): 458-66
- [67] Shonder JA, Beck JV. Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance. *ASHRAE Transactions* 2000; 106(1): 843-50.
- [68] Gehlin SEA, Hellström G. Comparison of four models for thermal response test evaluation. *ASHRAE Transactions* 2003; 109(1):131-42.

- [69] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. Tesis doctoral. Universidad de Lund. Lund, 1987.
- [70] Esen H, Inalli M. In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elaziğ, Turkey. *Energy and Buildings* 2009; 41:395-401.
- [71] Sharqawy MH, Said SA, Mokheimer EM, Habib MA, Badr HM, Al-Shayea NA. First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia. *Renewable Energy* 2009; 34:2218-23.
- [72] Lee C, Park M, Min S, Kang S-, Sohn B, Choi H. Comparison of effective thermal conductivity in closed-loop vertical ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* 2011; 31:3669-76.
- [73] ASHRAE Handbook: HVAC Applications. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 2007.
- [74] Desmedt J, Van Bael J, Hoes H, Robeyn N. Experimental performance of borehole heat exchangers and grouting materials for ground source heat pumps. *International Journal of Energy Research* 2012; 36:1238-46.
- [75] Bandos TV, Montero A, Fernández E, Santander JLG, Isidro JM, Pérez J et al. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics* 2009; 38:263-70.
- [76] Austin WA, Yavuzturk C, Spitler JD. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties. *ASHRAE Transactions* 2000; 106(1):365-79.
- [77] Sanner B, Hellström G, Spitler J, Gehlin S. Thermal response test-current status and world-wide application. *Proceedings World Geothermal Congress* 2005, 1436 2005.
- [78] Gustafsson A-, Westerlund L. Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole heat exchanger. *Renewable Energy* 2010; 35:1061-70.
- [79] Gustafsson A-, Westerlund L. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger - Investigation of the borehole thermal resistance. *Renewable Energy* 2011; 36:2388-94.
- [80] Chiasson AD. Advances in modeling of ground source heat pump systems. Tesis de Máster. Oklahoma State University. Stillwater, 1999.
- [81] Fujii H, Okubo H, Itoi R. Interpretation of thermal response tests in the presence of groundwater flow. *Transactions of the Geothermal Resources Council* 2007; 31:465-70.
- [82] Shonder JA, Beck JV. Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole thermal resistance. *ASHRAE Transactions* 1999; 106:843-50.

- [83] Wagner R, Clauser C. Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity. *Journal of Geophysics and Engineering* 2005; 2:349-56.
- [84] Marcotte D, Pasquier P. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy* 2008; 33:2407-15.
- [85] Bozzoli F, Pagliarini G, Rainieri S, Schiavi L. Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) data. *Energy* 2011; 36:839-46.
- [86] Al-Khoury R, Kölbel T, Schramedei R. Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers. *Computers and Geosciences* 2010; 36:1301-15.
- [87] ASTM C939-02. Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method). 2002.
- [88] UNE-EN 445-2009. Lechada para tendones de pretensado. Métodos de ensayo. 2009.
- [89] Ester B. Bermejo Nuñez. Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2009.
- [90] Diamantonis N, Marinos I, Katsiotis MS, Sakellariou A, Papathanasiou A, Kaloidas V et al. Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 2010; 24:1518-22.
- [91] Kim JH, Noemi N, Shah SP. Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites* 2012; 34:746-53.
- [92] Bustillo Revuelta M. Hormigones y Morteros. Madrid: Fuego, 2008.
- [93] Manso JM, Gonzalez JJ, Polanco JA. Electric arc furnace slag in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2004; 16:639-45.
- [94] Manso JM, Polanco JA, Losañez M, González JJ. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites* 2006; 28:528-34.
- [95] Papayianni I, Anastasiou E. Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Construction and Building Materials* 2010; 24(8): 1412-17
- [96] Pellegrino C, Gaddo V. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites* 2009; 31:663-71.

- [97] Polanco JA, Manso JM, Setién J, González JJ. Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag. *ACI Materials Journal* 2011; 108:196-203.
- [98] Vázquez Ramonich E, Barra M. Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction. *Materiales de Construcción* 2001; 2001:137-48.
- [99] Chen X, Wu S, Zhou J. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. *Construction and Building Materials* 2013; 40:869-74.
- [100] Gustafsson SE. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments* 1991; 62:797-804.
- [101] Bouguerra A, Ait-Mokhtar A, Amiri O, Diop MB. Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2001; 28:1065-78.
- [102] Al-Ajlan SA. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. *Applied Thermal Engineering* 2006; 26:2184-91.
- [103] Mikulic D, Milovanovic B, Gabrijel I. Analysis of thermal properties of cement paste during setting and hardening. *RILEM Bookseries* 2012; 6:465-71.
- [104] J. Cha, J. Seo, S. Kim, Building materials thermal conductivity measurement and correlation with heat flow meter, laser flash analysis and TCi. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109 (2012), Issue 1, 295-300.
- [105] ASTM D-5334-08. Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle procedure. 2008.
- [106] Seara-Paz S, González-Fontboa B, Eiras-López J, Herrador MF. Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete. *Materials and Structures* 2013; DOI:10.1617/s11527-013-0063-z.
- [107] Nuñez-Becerra D. Capítulo 8: Lodos tixotrópicos en cimentaciones profundas. En: López Jimeno C. Ingeniería del terreno, libro 10, Madrid: E.T.S.I. Minas-Universidad Politécnica de Madrid.; 2007, p. 261-72.
- [108] Holman JP. Transferencia de calor. 8ª edición. Madrid: Mc Graw Hill, 1999.
- [109] Zhang H-, Ge X-, Ye H, Jiao D-. Heat conduction and heat storage characteristics of soils. *Applied Thermal Engineering* 2007; 27:369-73.
- [110] Kumlutaş D, Tavman IH, Turhan Çoban M. Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials. *Composite Science and Technology* 2003; 63:113-7.
- [111] Hobson RS, McCabe JF, Hogg SD. Bond strength to surface enamel for different tooth types. *Dental Material* 2001; 17:184-9.

- [112] Burrow MF, Thomas D, Swain MV, Tyas MJ. Analysis of tensile bond strengths using Weibull statistics. *Biomaterials* 2004; 25:5031-5.
- [113] Hartig J, Jesse F, Schick Tanz K, Häußler-Combe U. Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. *Materials and Structures* 2012; 45:433-46.
- [114] García A, Norambuena-Contreras J, Partl M. A parametric study on the influence of steel wool fibers in dense asphalt concrete. *Materials and Structures* 2013; DOI: 10.1617/s11527-013-0135-0.
- [115] Maslehuddin M, Sharif AM, Shameem M, Ibrahim M, Barry MS. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials* 2003; 17:105-12.
- [116] CEDEX. Escorias de acería Linz Donawitz. <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/282.pdf>; 2007; 2011:10.
- [117] Llopis-Trillo G, López-Jimeno C. Guía técnica de sondeos geotérmicos superficiales. Madrid: Fenercom, 2009.
- [118] Sharqawy MH, Mokheimer EM, Badr HM. Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics* 2009; 38:271-7.
- [119] Raymond J, Therrien R, Gosselin L. Borehole temperature evolution during thermal response tests. *Geothermics* 2011; 40:69-78.
- [120] Lamarche L, Kaji S, Beauchamp B. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics* 2010; 39:187-200.
- [121] Hellstrom G, Sanner B. Software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction. *Proceeding of the Carlorstock'94, Espoo, Finland* 1994:195-200.
- [122] Hurter S, Haenel R, (Eds). Atlas of Geothermal Resources in Europe. *Official Publications of the European Communities* 2002.
- [123] Park M, Min S, Lim J, Choi JM, Choi H. Applicability of cement-based grout for ground heat exchanger considering heating-cooling cycles. *Science China-Technological Sciences* 2011; 54:1661-7.

ANEXO DE RESULTADOS

A1. INFLUENCIA DEL TIPO Y PROPORCIÓN DE ÁRIDO EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y RESISTENTES DE LOS RELLENOS GEOTÉRMICOS

Amasada	Densidad aparente en fresco (UNE-EN 1015-6)			Densidad aparente en endurecido (EN 1015-10:1998)			Resistencia a flexo-tracción y a compresión simple (UNE-EN 1015-11)				Conductividad Térmica (Tci C-Therm)
	Arido 1	Arido 2	Arido/cemento	Fecha ensayo	Densidad	Porosidad accesible	Resistencia a flexo-tracción (7 días)	Resistencia a compresión (7 días)	Resistencia a flexo-tracción (28 días)	Resistencia a compresión (28 días)	
-	-	-	kg/kg	dd/mm/aaaa	kg/m3	(%)	N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2	W/(m K)
S	O	2	05/11/2010	2197,5	Bien	6,0	13,4	58,7	5,9	61,6	1,71
E	F	2	08/11/2010	2155,9	Segregación	7,5	1,5	57,6	1,3	66,6	
E	F	2	09/11/2010	2514,1	Bien	4,6	7,9	67,4	5,8	73,6	1,17
R	F	2	12/11/2010	1953,8	Segregación	17,4	0,5	25,8	1,4	27,5	
R	F	2	22/11/2010	2024,3	Espeso	10,6	4,1	37,6	0,2	38,0	1,09
C	O	2	14/12/2010	2258,3	Bien	3,9	11,7	69,0	8,0	75,7	1,76
R	F	2	15/12/2010	2046,3	Bien	9,2	8,3	37,8	5,9	41,5	1,21
C	O	3	12/01/2011	2361,8	Bien	5,9	9,1	66,2	14,5	66,4	1,80
S	O	3	14/01/2011	2216,2	Bien	8,3	11,6	58,2	17,1	59,0	2,09
E	F	3	17/01/2011	2624,6	Espeso	6,6	9,7	67,4	13,3	72,2	1,45
R	F	3	27/01/2011	1972,7	Espeso	21,5	4,1	21,4	6,9	25,8	1,10
R	F	3	10/02/2011	1993,5	Espeso	18,2	5,3	26,0	6,0	26,8	
C	O	1	15/02/2011	2188,9	Segregación	9,1	11,6	67,1	8,6	70,8	
C	O	1	16/02/2011	2172,1	Segregación	0,5	13,8	71,3	4,4	69,8	
Nomenclatura: C-Arena caliza; E-Escoria de acería de horno de arco eléctrico; R-Residuos de construcción y demolición; S-Arena silicea; F-Filler calizo.											
*Apariencia:											
1. <u>Espeso</u> : No se pudo rellenar el molde por sí solo, por lo que se empleó una barra de acero para ello.											
2. <u>Bien</u> : Mezclas cuya consistencia resultó dentro del rango establecido y los moldes se pudieron llenar correctamente.											
3. <u>Líquido</u> : Mezclas cuya consistencia fue al rango establecido sin presentar segregación, Los moldes se pudieron llenar correctamente.											
4. <u>Segregación</u> : Las mezclas fueron descartadas por presentar segregación.											

Amasada	Densidad aparente en fresco (UNE-EN 1015-6)			Densidad aparente en endurecido (EN 1015-10:1998)			Resistencia a flexo-tracción y a compresión simple (UNE-EN 1015-11)				Conductividad Térmica (Tci C-Therm)
	Fecha ensayo	Densidad	Apariencia*	Fecha ensayo	Densidad	Porosidad accesible	Resistencia a flexo-tracción (7 días)	Resistencia a compresión (7 días)	Resistencia a flexo-tracción (28 días)	Resistencia a compresión (28 días)	
-	dd/mm/aaaa	kg/m3	-	dd/mm/aaaa	kg/m3	(%)	N/mm2	N/mm2	N/mm2	N/mm2	W/(m K)
Arido 1											
Arido 2											
Arido/cemento											
-	kg/kg										
C 0	1	17/02/2011	2217,8	líquido	18/03/2011	2146,0	7,2	7,0	82,2	78,7	1,60
E F	1	23/02/2011	2332,1	Espeso	23/03/2011	2281,2	7,1	11,4	68,8	79,2	
S 0	1	25/02/2011	2152,5	Bien	25/03/2011	2049,8	9,3	13,1	67,6	73,9	1,83
R F	1	03/03/2011	2064,8	líquido	31/03/2011	1935,0	10,4	10,4	50,1	52,4	
R F	1	08/03/2011	2054,6	líquido	05/04/2011	1864,0	13,9	7,2	48,2	54,6	
R F	1	10/03/2011	2053,2	Bien	07/04/2011	1879,5	11,2	9,5	47,8	52,7	1,27
E F	1	15/03/2011	2340,3	Bien	13/04/2011	2312,7	7,5	10,7	68,3	74,7	1,42
R F	3	04/04/2011	1938,7	Espeso	02/05/2011	1600,7	23,4	2,5	13,2	21,0	
R F	3	07/04/2011	1933,7	Bien	05/05/2011	1625,9	20,7	4,2	20,1	18,8	1,01
E F	3	07/04/2011	2525,9	Bien	05/05/2011	2398,4	7,4	11,8	56,0	58,2	1,51
S 0	2	13/06/2011	2197,5	Bien	07/07/2011	2112,9	6,3	13,4	57,0	61,1	1,99
E F	2	15/06/2011	2514,1	Bien	13/07/2011	2443,8	7,2	7,9	66,9	74,0	1,50
Lechada de cemento		18/01/2012	2015,8	Bien	15/02/2012	1828,5	14,5		69,7	67,3	0,89
Nomenclatura: C-Arena caliza; E-Escoria de acería de horno de arco eléctrico; R-Residuos de construcción y demolición; S-Arena silicea; F-Filler calizo,											
*Apariencia:											
1. <u>Espeso</u> : No se pudo rellenar el molde por sí solo, por lo que se empleó una barra de acero para ello.											
2. <u>Bien</u> : Mezclas cuya consistencia resultó dentro del rango establecido y los moldes se pudieron llenar correctamente.											
3. <u>Líquido</u> : Mezclas cuya consistencia fue al rango establecido sin presentar segregación, Los moldes se pudieron llenar correctamente.											
4. <u>Segregación</u> : Las mezclas fueron descartadas por presentar segregación.											

A2. DURABILIDAD DE LOS RELLENOS FRENTE A CICLOS DE HIELO-DESHIELO.

(L): Densidad aparente en endurecido (UNE-EN 1015-10)							(RCD): Densidad aparente en endurecido (UNE-EN 1015-10)						
Nº probeta	Tratamiento	Nº ciclos	m _{sat}	m _{sum}	m _{seca}		Nº probeta	Tratamiento	Nº ciclos	m _{sat}	m _{sum}	m _{seca}	
7	Sumergidas en agua	Inicio	573	295,6	511,2		7	Sumergidas en agua	Inicio	509,2	260,5	442,5	
8	Sumergidas en agua	Inicio	567,8	293,9	507,5		8	Sumergidas en agua	Inicio	509,4	260,8	442,2	
7	Sumergidas en agua	7	575	297,6	-		7	Sumergidas en agua	7	510,5	261,5	-	
8	Sumergidas en agua	7	570	295,8	-		8	Sumergidas en agua	7	509,8	261,5	-	
7	Sumergidas en agua	14	577,6	298,4	-		7	Sumergidas en agua	14	509,5	262	-	
8	Sumergidas en agua	14	572,3	296,7	-		8	Sumergidas en agua	14	509,5	262,2	-	
7	Sumergidas en agua	25	576	298,8	519,5		7	Sumergidas en agua	25	510,1	262,8	453,6	
8	Sumergidas en agua	25	571,4	297,4	515,6		8	Sumergidas en agua	25	510,1	263,4	452,9	
17	Sumergidas en agua	25	564,4	290,8	505,6		17	Sumergidas en agua	25	527,8	270,7	458,8	
18	Sumergidas en agua	25	548,6	284,2	493		18	Sumergidas en agua	25	525,9	270,1	460,4	
9	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	559,6	289,8	501,3		9	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	526,6	269	457,7	
10	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	551,3	283,1	491,2		10	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	515,4	263,2	440,6	
9	Ciclos de hielo-deshielo	7	564,1	292,1	-		9	Ciclos de hielo-deshielo	7	525	268,9	-	
10	Ciclos de hielo-deshielo	7	555,6	285,4	-		10	Ciclos de hielo-deshielo	7	514	263,1	-	
9	Ciclos de hielo-deshielo	14	568	292,2	-		9	Ciclos de hielo-deshielo	14	525,3	269,8	-	
10	Ciclos de hielo-deshielo	14	558,9	286,5	-		10	Ciclos de hielo-deshielo	14	514,5	264	-	
9	Ciclos de hielo-deshielo	25	517,2	278,4	434,3		9	Ciclos de hielo-deshielo	25	526,1	270,4	462,8	
10	Ciclos de hielo-deshielo	25	552,4	283,5	462,1		10	Ciclos de hielo-deshielo	25	515,5	265,1	445	
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	548,3	282,1	486,5		23	Ciclos de hielo-deshielo	25	524	268,2	454,3	
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	545,9	280,7	487,9		24	Ciclos de hielo-deshielo	25	518,1	265,5	449,5	

(C): Densidad aparente en endurecido (UNE-EN 1015-10)						(EAE): Densidad aparente en endurecido (UNE-EN 1015-10)					
Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	m _{sat}	m _{sum}	m _{seca}	Nº probeta	Tratamiento	Nº ciclos	m _{sat}	m _{sum}	m _{seca}
7	Sumergidas en agua	Inicio	634,5	362,1	599,5	7	Sumergidas en agua	Inicio	711,5	439,7	657,7
8	Sumergidas en agua	Inicio	605,9	346	573,7	8	Sumergidas en agua	Inicio	707,9	438,2	653,7
7	Sumergidas en agua	7	632,4	360,2	-	7	Sumergidas en agua	7	710,1	438,1	-
8	Sumergidas en agua	7	603	343,4	-	8	Sumergidas en agua	7	706,3	437	-
7	Sumergidas en agua	14	636	362,7	-	13	Sumergidas en agua	14	709,9	438,9	656,6
8	Sumergidas en agua	14	606,2	346,3	-	14	Sumergidas en agua	14	714,8	442,8	660,3
13	Sumergidas en agua	7	604,2	345,5	572,1	7	Sumergidas en agua	14	711,8	439,8	-
14	Sumergidas en agua	7	600,1	342,7	567,7	8	Sumergidas en agua	14	707,9	437,9	-
15	Sumergidas en agua	14	596,5	340,6	565,4	15	Sumergidas en agua	25	716,8	441,8	662,5
16	Sumergidas en agua	14	619,4	354,3	588,7	16	Sumergidas en agua	25	693,2	422,8	640,5
7	Sumergidas en agua	25	637,4	364,4	605,9	7	Sumergidas en agua	25	712,8	440,6	670,9
8	Sumergidas en agua	25	607,5	347,5	578,8	8	Sumergidas en agua	25	709	439	666,9
17	Sumergidas en agua	25	586,9	335,1	557,7	17	Sumergidas en agua	25	694,6	426,5	651,4
18	Sumergidas en agua	25	618,3	353,8	592,5	18	Sumergidas en agua	25	697,4	428	651,5
9	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	587	334,7	556,4	9	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	699,7	430,8	645
10	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	623,4	355,5	592,3	10	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	715,1	442,8	662,8
9	Ciclos de hielo-deshielo	7	586,5	334,6	-	11	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	718,4	444,9	663
10	Ciclos de hielo-deshielo	7	623,1	355,3	-	12	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	708,5	438,7	653,5
19	Ciclos de hielo-deshielo	7	618,1	352,9	586,3	9	Ciclos de hielo-deshielo	7	699,6	430,7	-
20	Ciclos de hielo-deshielo	7	611,8	349,3	578,9	10	Ciclos de hielo-deshielo	7	715,1	442,5	-
9	Ciclos de hielo-deshielo	14	588,7	335,6	-	19	Ciclos de hielo-deshielo	7	687	421,9	641,2
10	Ciclos de hielo-deshielo	14	625,5	356,3	-	20	Ciclos de hielo-deshielo	7	714,3	444,5	661,9
21	Ciclos de hielo-deshielo	14	581,5	331,5	554,6	9	Ciclos de hielo-deshielo	14	699,9	431	-
22	Ciclos de hielo-deshielo	14	601,6	343,8	573,5	10	Ciclos de hielo-deshielo	14	715,5	442,5	-
9	Ciclos de hielo-deshielo	25	590,6	336	562,3	21	Ciclos de hielo-deshielo	14	716,3	444,5	664,9
10	Ciclos de hielo-deshielo	25	626,8	357,1	598,5	22	Ciclos de hielo-deshielo	14	727,9	455,7	677
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	591	337,6	563,6	9	Ciclos de hielo-deshielo	25	700,4	431,3	652,5
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	591	337,6	567,9	10	Ciclos de hielo-deshielo	25	715,9	442,7	667,1
						23	Ciclos de hielo-deshielo	25	737	462,4	687,4
						24	Ciclos de hielo-deshielo	25	739,1	464	688,5

(L): Resistencia a flexotracción y compresión simple (UNE-EN 1015-11)

Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	Flexión(N)	Comp ₁ (ton)	Comp ₂ (ton)
11	Sumergidas en agua	0	1040	10,3	10,6
12	Sumergidas en agua	0	1030	11,1	11,0
13	Sumergidas en agua	7	940	11,1	11,4
14	Sumergidas en agua	7	978	11,4	11,0
15	Sumergidas en agua	14	700	10,4	11,0
16	Sumergidas en agua	14	764	10,0	11,4
17	Sumergidas en agua	25	1018	10,8	11,5
18	Sumergidas en agua	25	712	11,6	11,5
19	Ciclos de hielo-deshielo	7	Rota/306	10,3	-
20	Ciclos de hielo-deshielo	7	Rota/1113	10,4	11,3
21	Ciclos de hielo-deshielo	14	Fis/137	11,6	11,9
22	Ciclos de hielo-deshielo	14	Rota/23	11,7	11,0
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	Rota	11,6	11,8
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	824	11,3	11,3

(RCD): Resistencia a flexotracción y compresión simple (UNE-EN 1015-11)

Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	Flexión(N)	Comp ₁ (ton)	Comp ₂ (ton)
11	Sumergidas en agua	0	2538	5,5	5,4
12	Sumergidas en agua	0	2685	4,8	5,4
13	Sumergidas en agua	7	3000	6,0	6,1
14	Sumergidas en agua	7	2770	5,1	5,7
15	Sumergidas en agua	14	2699	5,6	5,3
16	Sumergidas en agua	14	2398	5,8	6,1
17	Sumergidas en agua	25	2802	5,8	5,6
18	Sumergidas en agua	25	2739	6,3	5,9
19	Ciclos de hielo-deshielo	7	2922	5,6	5,2
20	Ciclos de hielo-deshielo	7	2984	5,5	5,8
21	Ciclos de hielo-deshielo	14	2490	5,8	6,1
22	Ciclos de hielo-deshielo	14	2505	6,1	5,9
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	2954	5,9	6,5
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	2951	6,0	6,2

(S): Densidad aparente en endurecido (UNE-EN 1015-10)

Nº probeta	Tratamiento	Nº ciclos	m _{sat}	m _{sum}	m _{seca}
7	Sumergidas en agua	Inicio	564,4	312,6	527
8	Sumergidas en agua	Inicio	573,3	317,3	535
7	Sumergidas en agua	7	563,7	312,0	-
8	Sumergidas en agua	7	572,2	316,5	-
7	Sumergidas en agua	14	564,3	312,8	-
8	Sumergidas en agua	14	573,0	317,2	-
7	Sumergidas en agua	25	565,4	313,5	533,0
8	Sumergidas en agua	25	573,7	317,9	540,8
17	Sumergidas en agua	25	579,3	322,1	545,5
18	Sumergidas en agua	25	588,6	327,6	555,2
9	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	555,6	307,6	518,1
10	Ciclos de hielo-deshielo	Inicio	559,8	310,4	522,4
9	Ciclos de hielo-deshielo	7	554,0	306,4	-
10	Ciclos de hielo-deshielo	7	558,4	308,9	-
9	Ciclos de hielo-deshielo	14	554,7	306,9	-
10	Ciclos de hielo-deshielo	14	559,2	309,7	-
9	Ciclos de hielo-deshielo	25	555,7	307,2	515,3
10	Ciclos de hielo-deshielo	25	560,1	310,2	521,3
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	587,4	325,6	544,7
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	569,0	315,0	528,1

(EAE): Resistencia a flexotracción y compresión simple (UNE-EN 1015-11)

Nº probeta	Ciclos	Nº Ciclos	Flexión(N)	Comp ₁ (ton)	Comp ₂ (ton)
11	Sumergidas en agua	0	3704	8,4	8,4
12	Sumergidas en agua	0	3553	9,1	9,2
13	Sumergidas en agua	7	3662	8,0	8,0
14	Sumergidas en agua	7	4181	9,1	9,2
15	Sumergidas en agua	14	3138	8,7	8,4
16	Sumergidas en agua	14	2817	9,2	8,9
17	Sumergidas en agua	25	2699	9,1	8,8
18	Sumergidas en agua	25	2944	9,0	9,2
19	Ciclos de hielo-deshielo	7	3494	12,0	12,1
20	Ciclos de hielo-deshielo	7	4656	8,9	9,7
21	Ciclos de hielo-deshielo	14	3743	9,4	8,9
22	Ciclos de hielo-deshielo	14	3922	9,3	9,1
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	4074	9,5	9,6
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	4426	9,2	8,9

(C): Resistencia a flexotracción y compresión simple (UNE-EN 1015-11)

Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	Flexión(N)	Comp ₁ (ton)	Comp ₂ (ton)
11	Sumergidas en agua	0	4337	11,5	11,4
12	Sumergidas en agua	0	3648	11,2	11,5
13	Sumergidas en agua	7	3966	11,4	11,1
14	Sumergidas en agua	7	4257	11,3	11,7
15	Sumergidas en agua	14	4850	11,5	10,2
16	Sumergidas en agua	14	4806	10,7	10,8
17	Sumergidas en agua	25	4071	11,9	11,4
18	Sumergidas en agua	25	3972	12,1	11,3
19	Ciclos de hielo-deshielo	7	2776	11,5	12,0
20	Ciclos de hielo-deshielo	7	4594	10,9	10,5
21	Ciclos de hielo-deshielo	14	2790	12,0	12,4
22	Ciclos de hielo-deshielo	14	3651	10,8	10,8
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	3198	10,9	10,8
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	2594	10,6	12,6

(S): Resistencia a flexotracción y compresión simple (UNE-EN 1015-11)

Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	Flexión(N)	Comp ₁ (ton)	Comp ₂ (ton)
11	Sumergidas en agua	0	5117	11,1	11,6
12	Sumergidas en agua	0	5650	10,6	6,9
13	Sumergidas en agua	7	5611	11,9	11,4
14	Sumergidas en agua	7	6039	11,7	10,7
15	Sumergidas en agua	14	4373	10,9	11,4
16	Sumergidas en agua	14	4056	9,8	11,5
17	Sumergidas en agua	25	6112	9,4	11,3
18	Sumergidas en agua	25	6278	10,5	11,0
19	Ciclos de hielo-deshielo	7	4747	11,3	11,4
20	Ciclos de hielo-deshielo	7	5960	9,2	11,5
21	Ciclos de hielo-deshielo	14	5354	9,7	11,3
22	Ciclos de hielo-deshielo	14	4328	9,8	10,4
23	Ciclos de hielo-deshielo	25	6799	11,1	7,3
24	Ciclos de hielo-deshielo	25	6630	11,0	12,0

(L): Resistencia de adherencia entre la sonda y el relleno					(RCD): Resistencia de adherencia entre la sonda y el relleno				
Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	F _{adherencia} (N)		Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	F _{adherencia} (N)	
28	Sumergidas en agua	Inicio	609		28	Sumergidas en agua	Inicio	703	
29	Sumergidas en agua	Inicio	348		29	Sumergidas en agua	Inicio	804	
30	Sumergidas en agua	Inicio	502		30	Sumergidas en agua	Inicio	557	
31	Sumergidas en agua	7	940		31	Sumergidas en agua	7	894	
32	Sumergidas en agua	7	592		32	Sumergidas en agua	7	943	
33	Sumergidas en agua	7	1197		33	Sumergidas en agua	7	1197	
34	Sumergidas en agua	14	773		34	Sumergidas en agua	14	932	
35	Sumergidas en agua	14	342		35	Sumergidas en agua	14	1106	
36	Sumergidas en agua	14	384		36	Sumergidas en agua	14	1041	
37	Sumergidas en agua	25	396		37	Sumergidas en agua	25	1393	
38	Sumergidas en agua	25	347		38	Sumergidas en agua	25	1230	
39	Sumergidas en agua	25	739		39	Sumergidas en agua	25	1547	
40	Ciclos de hielo-deshielo	7	145		40	Ciclos de hielo-deshielo	7	600	
41	Ciclos de hielo-deshielo	7	703		41	Ciclos de hielo-deshielo	7	498	
42	Ciclos de hielo-deshielo	7	673		42	Ciclos de hielo-deshielo	7	356	
43	Ciclos de hielo-deshielo	14	314		43	Ciclos de hielo-deshielo	14	437	
44	Ciclos de hielo-deshielo	14	398		44	Ciclos de hielo-deshielo	14	436	
45	Ciclos de hielo-deshielo	14	Rota a los 4 ciclos		45	Ciclos de hielo-deshielo	14	535	
46	Ciclos de hielo-deshielo	25	507		46	Ciclos de hielo-deshielo	25	915	
47	Ciclos de hielo-deshielo	25	Rota a los 7 ciclos		47	Ciclos de hielo-deshielo	25	874	
48	Ciclos de hielo-deshielo	25	599		48	Ciclos de hielo-deshielo	25	615	

(C): Resistencia de adherencia entre la sonda y el relleno				
Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	F _{adherencia} (N)	
28	Sumergidas en agua	Inicio	2110	
29	Sumergidas en agua	Inicio	2668	
30	Sumergidas en agua	Inicio	2343	
31	Sumergidas en agua	7	1056	
32	Sumergidas en agua	7	5392	
33	Sumergidas en agua	7	1277	
34	Sumergidas en agua	14	1463	
35	Sumergidas en agua	14	1471	
36	Sumergidas en agua	14	1282	
37	Sumergidas en agua	25	-	
38	Sumergidas en agua	25	1890	
39	Sumergidas en agua	25	2309	
40	Ciclos de hielo-deshielo	7	806	
41	Ciclos de hielo-deshielo	7	743	
42	Ciclos de hielo-deshielo	7	1627	
43	Ciclos de hielo-deshielo	14	941	
44	Ciclos de hielo-deshielo	14	1367	
45	Ciclos de hielo-deshielo	14	1320	
46	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	
47	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	
48	Ciclos de hielo-deshielo	25	1516	

(EAE): Resistencia de adherencia entre la sonda y el relleno				
Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	F _{adherencia} (N)	
28	Sumergidas en agua	Inicio	1034	
29	Sumergidas en agua	Inicio	614	
30	Sumergidas en agua	Inicio	722	
31	Sumergidas en agua	7	1042	
32	Sumergidas en agua	7	969	
33	Sumergidas en agua	7	993	
34	Sumergidas en agua	14	1338	
35	Sumergidas en agua	14	1306	
36	Sumergidas en agua	14	1568	
37	Sumergidas en agua	25	2115	
38	Sumergidas en agua	25	2076	
39	Sumergidas en agua	25	1660	
40	Ciclos de hielo-deshielo	7	449	
41	Ciclos de hielo-deshielo	7	446	
42	Ciclos de hielo-deshielo	7	350	
43	Ciclos de hielo-deshielo	14	1082	
44	Ciclos de hielo-deshielo	14	1013	
45	Ciclos de hielo-deshielo	14	705	
46	Ciclos de hielo-deshielo	25	1319	
47	Ciclos de hielo-deshielo	25	1395	
48	Ciclos de hielo-deshielo	25	1405	

(S): Resistencia de adherencia entre la sonda y el relleno									
Nº probeta	Tratamiento	Nº Ciclos	F _{adherencia} (N)						
28	Sumergidas en agua	Inicio	379						
29	Sumergidas en agua	Inicio	378						
30	Sumergidas en agua	Inicio	526						
31	Sumergidas en agua	7	610						
32	Sumergidas en agua	7	891						
33	Sumergidas en agua	7	681						
34	Sumergidas en agua	14	749						
35	Sumergidas en agua	14	695						
36	Sumergidas en agua	14	520						
37	Sumergidas en agua	25	876						
38	Sumergidas en agua	25	769						
39	Sumergidas en agua	25	814						
40	Ciclos de hielo-deshielo	7	510						
41	Ciclos de hielo-deshielo	7	603						
42	Ciclos de hielo-deshielo	7	552						
43	Ciclos de hielo-deshielo	14	435						
44	Ciclos de hielo-deshielo	14	329						
45	Ciclos de hielo-deshielo	14	550						
46	Ciclos de hielo-deshielo	25	633						
47	Ciclos de hielo-deshielo	25	540						
48	Ciclos de hielo-deshielo	25	598						

(L): Conductividad térmica aparente k (W/(m k)) (ASTM D5334-08)									
Nº probeta	Ciclos	Nº Ciclos	ID _{exp}	k ₁	ID _{exp}	k ₂	ID _{exp}	k ₃	
1	Sumergidas en agua	0	414	0,89	419	0,89	424	0,90	
2	Sumergidas en agua	0	413	0,90	418	0,90	423	0,89	
3	Sumergidas en agua	0	-	-	-	-	-	-	
1	Sumergidas en agua	7	434	0,91	436	0,92	438	0,92	
2	Sumergidas en agua	7	435	0,92	437	0,92	439	0,90	
3	Sumergidas en agua	7	-	-	-	-	-	-	
1	Sumergidas en agua	14	467	0,91	469	0,95	471	0,95	
2	Sumergidas en agua	14	468	0,98	470	0,94	472	0,94	
3	Sumergidas en agua	14	-	-	-	-	-	-	
1	Sumergidas en agua	25	536	0,89	538	0,90	540	0,90	
2	Sumergidas en agua	25	537	0,90	539	0,90	541	0,92	
3	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-	
4	Ciclos de hielo-deshielo	0	411	0,91	416	0,89	421	0,88	
5	Ciclos de hielo-deshielo	0	410	0,92	415	0,96	420	0,88	
6	Ciclos de hielo-deshielo	0	412	0,91	417	0,91	422	0,91	
4	Ciclos de hielo-deshielo	7	425	0,89	428	0,89	431	0,88	
5	Ciclos de hielo-deshielo	7	426	0,92	429	0,91	432	0,90	
6	Ciclos de hielo-deshielo	7	427	0,92	430	0,90	433	0,90	
4	Ciclos de hielo-deshielo	14	458	0,89	461	0,91	464	0,90	
5	Ciclos de hielo-deshielo	14	459	0,92	462	0,92	465	0,91	
6	Ciclos de hielo-deshielo	14	460	0,90	463	0,89	466	0,91	
4	Ciclos de hielo-deshielo	25	527	0,88	530	0,90	533	0,90	
5	Ciclos de hielo-deshielo	25	528	0,94	531	0,93	534	0,91	
6	Ciclos de hielo-deshielo	25	529	0,91	532	0,91	535	0,91	

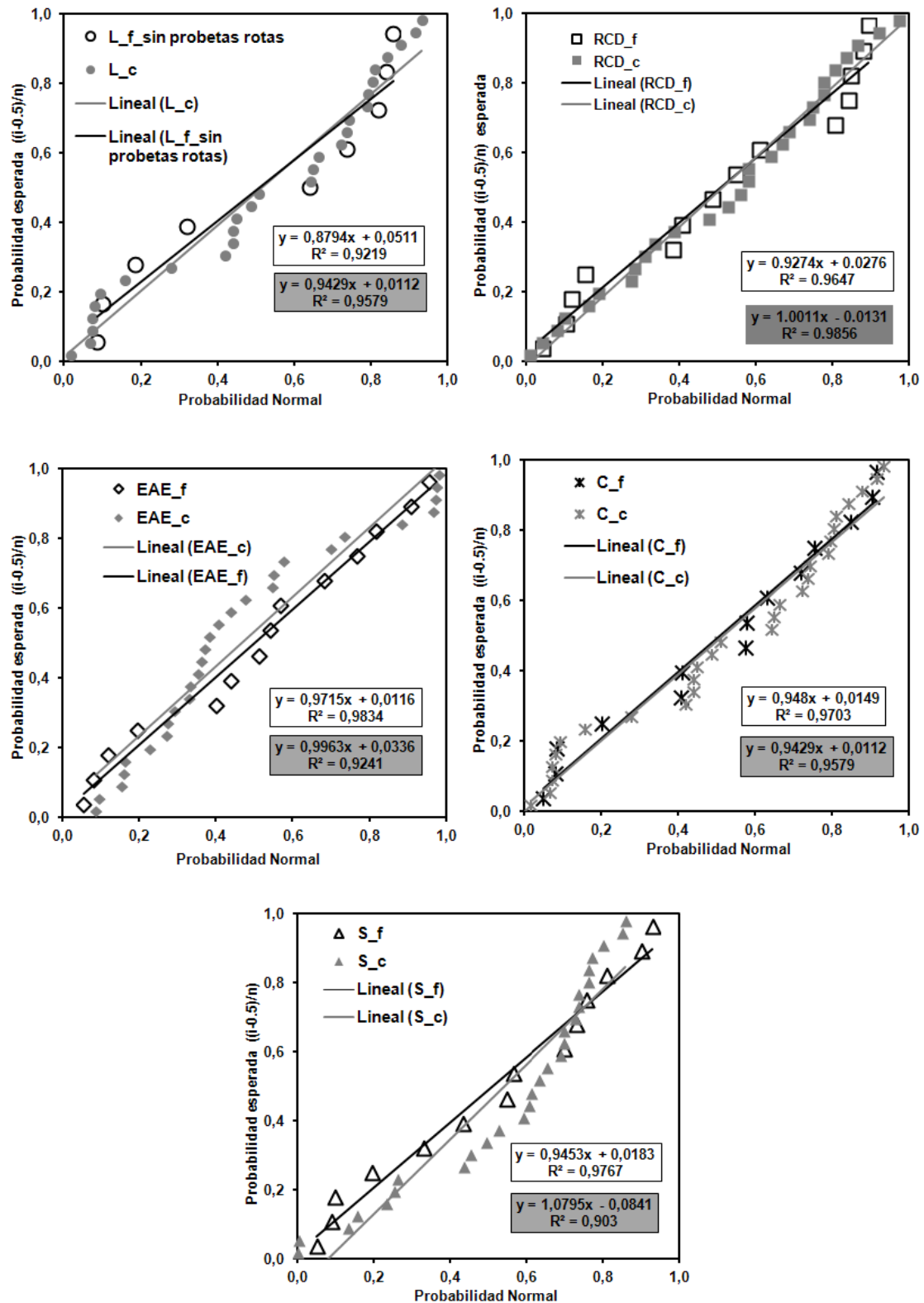
(C): Conductividad térmica aparente k (W/(m K)) (ASTM D5334-08)										
Nº probeta	Ciclos	Nº Ciclos	ID _{exp}	k ₁	ID _{exp}	k ₂	ID _{exp}	k ₃		
1	Sumergidas en agua	0	634	1,65	637	1,64	640	1,61		
2	Sumergidas en agua	0	635	1,61	638	1,57	641	1,62		
3	Sumergidas en agua	0	636	1,60	639	1,60	642	1,59		
1	Sumergidas en agua	7	683	1,55	686	1,60	689	1,55		
2	Sumergidas en agua	7	684	1,63	687	1,56	690	1,57		
3	Sumergidas en agua	7	685	1,57	688	1,54	691	1,65		
1	Sumergidas en agua	14	738	1,56	741	1,55	744	1,58		
2	Sumergidas en agua	14	739	1,50	742	1,48	745	1,51		
3	Sumergidas en agua	14	740	1,66	743	1,61	746	1,67		
1	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-		
2	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-		
3	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-		
4	Ciclos de hielo-deshielo	0	625	1,58	628	1,61	631	1,65		
5	Ciclos de hielo-deshielo	0	626	1,35	629	1,55	632	1,58		
6	Ciclos de hielo-deshielo	0	627	1,42	630	1,64	633	1,53		
4	Ciclos de hielo-deshielo	7	674	1,75	677	1,59	680	1,59		
5	Ciclos de hielo-deshielo	7	675	1,66	678	1,56	681	1,60		
6	Ciclos de hielo-deshielo	7	676	1,61	679	1,59	682	1,57		
4	Ciclos de hielo-deshielo	14	729	1,73	732	1,65	735	1,71		
5	Ciclos de hielo-deshielo	14	730	1,67	733	1,56	736	1,53		
6	Ciclos de hielo-deshielo	14	731	1,58	734	1,66	737	1,59		
4	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	-	-	-	-	-		
5	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	-	-	-	-	-		
6	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	-	-	-	-	-		

(RCD): Conductividad térmica aparente k (W/(m K)) (ASTM D5334-08)										
Nº probeta	Ciclos	Nº Ciclos	ID _{exp}	k ₁	ID _{exp}	k ₂	ID _{exp}	k ₃		
1	Sumergidas en agua	0	449	1,40	452	1,38	455	1,39		
2	Sumergidas en agua	0	450	1,41	453	1,42	456	1,41		
3	Sumergidas en agua	0	451	1,48	454	1,44	457	1,51		
1	Sumergidas en agua	7	482	1,45	485	1,41	488	1,40		
2	Sumergidas en agua	7	483	1,53	486	1,39	489	1,40		
3	Sumergidas en agua	7	484	1,55	487	1,45	490	1,48		
1	Sumergidas en agua	14	518	1,37	521	1,35	524	1,36		
2	Sumergidas en agua	14	519	1,35	522	1,37	525	1,39		
3	Sumergidas en agua	14	520	1,41	523	1,42	526	1,44		
1	Sumergidas en agua	25	569	1,34	572	1,36	575	1,30		
2	Sumergidas en agua	25	570	1,36	573	1,37	576	1,37		
3	Sumergidas en agua	25	571	1,40	574	1,44	577	1,44		
4	Ciclos de hielo-deshielo	0	440	1,40	443	1,35	446	1,39		
5	Ciclos de hielo-deshielo	0	441	1,33	444	1,39	447	1,37		
6	Ciclos de hielo-deshielo	0	442	1,36	445	1,41	448	1,43		
4	Ciclos de hielo-deshielo	7	473	1,43	476	1,37	479	1,38		
5	Ciclos de hielo-deshielo	7	474	1,40	477	1,39	480	1,40		
6	Ciclos de hielo-deshielo	7	475	1,37	478	1,38	481	1,39		
4	Ciclos de hielo-deshielo	14	509	1,34	512	1,38	515	1,37		
5	Ciclos de hielo-deshielo	14	510	1,38	513	1,37	516	1,37		
6	Ciclos de hielo-deshielo	14	511	1,39	514	1,38	517	1,39		
4	Ciclos de hielo-deshielo	25	560	1,40	563	1,32	566	1,34		
5	Ciclos de hielo-deshielo	25	561	1,37	564	1,37	567	1,37		
6	Ciclos de hielo-deshielo	25	562	1,28	565	1,35	568	1,40		

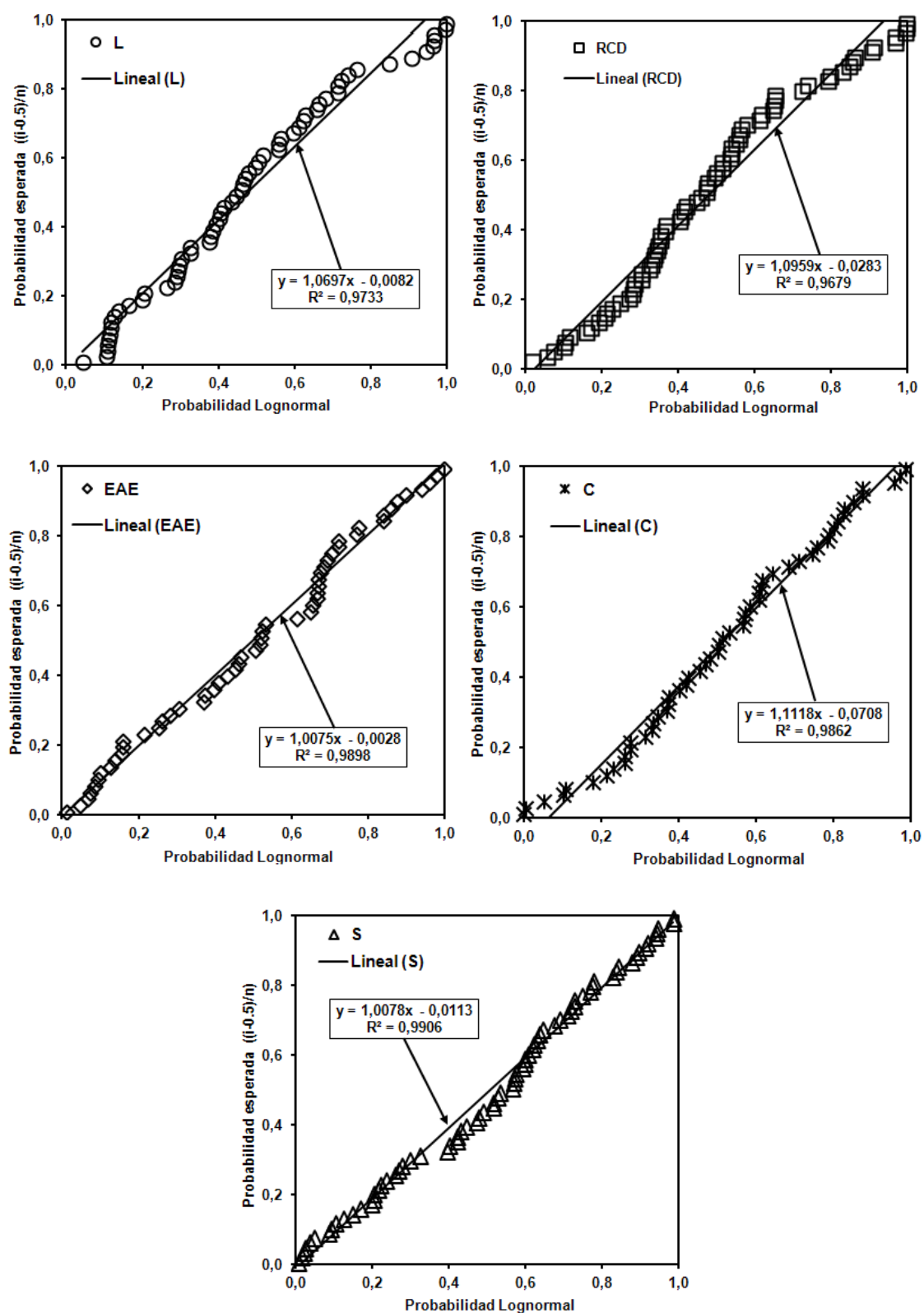
(EAE): Conductividad térmica aparente k (W/(m k)) (ASTM D5334-08)									
Nº probeta	Ciclos	Nº Ciclos	ID _{exp}	k ₁	ID _{exp}	k ₂	ID _{exp}	k ₃	
1	Sumergidas en agua	0	665	1,19	668	1,19	671	1,20	
2	Sumergidas en agua	0	666	1,26	669	1,23	672	1,21	
3	Sumergidas en agua	0	667	1,20	670	1,22	673	1,22	
1	Sumergidas en agua	7	701	1,16	704	1,21	707	1,19	
2	Sumergidas en agua	7	702	1,22	705	1,23	708	1,18	
3	Sumergidas en agua	7	703	1,20	706	1,22	709	1,26	
1	Sumergidas en agua	14	747	1,21	750	1,22	753	1,24	
2	Sumergidas en agua	14	748	1,24	751	1,25	754	1,24	
3	Sumergidas en agua	14	749	1,22	752	1,24	755	1,24	
1	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-	
2	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-	
3	Sumergidas en agua	25	-	-	-	-	-	-	
4	Ciclos de hielo-deshielo	0	656	1,18	659	1,20	662	1,24	
5	Ciclos de hielo-deshielo	0	657	1,23	660	1,22	663	1,24	
6	Ciclos de hielo-deshielo	0	658	1,19	661	1,21	664	1,19	
4	Ciclos de hielo-deshielo	7	692	1,24	695	1,26	698	1,24	
5	Ciclos de hielo-deshielo	7	693	1,31	696	1,23	699	1,25	
6	Ciclos de hielo-deshielo	7	694	1,26	697	1,22	700	1,26	
4	Ciclos de hielo-deshielo	14	756	1,24	759	1,29	762	1,24	
5	Ciclos de hielo-deshielo	14	757	1,20	760	1,28	763	1,27	
6	Ciclos de hielo-deshielo	14	758	1,23	761	1,24	764	1,24	
4	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	-	-	-	-	-	
5	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	-	-	-	-	-	
6	Ciclos de hielo-deshielo	25	-	-	-	-	-	-	

(S): Conductividad térmica aparente k (W/(m k)) (ASTM D5334-08)									
Nº probeta	Ciclos	Nº Ciclos	ID _{exp}	k ₁	ID _{exp}	k ₂	ID _{exp}	k ₃	
1	Sumergidas en agua	0	500	2,36	503	2,23	506	2,28	
2	Sumergidas en agua	0	501	2,53	504	2,39	507	2,56	
3	Sumergidas en agua	0	502	2,40	505	2,41	508	2,58	
1	Sumergidas en agua	7	542	2,38	554	2,27	557	2,26	
2	Sumergidas en agua	7	552	2,49	555	2,55	558	2,44	
3	Sumergidas en agua	7	553	2,48	556	2,41	559	2,41	
1	Sumergidas en agua	14	587	2,45	590	2,15	593	2,19	
2	Sumergidas en agua	14	588	2,47	591	2,45	594	2,40	
3	Sumergidas en agua	14	589	2,56	592	2,35	595	2,32	
1	Sumergidas en agua	25	609	2,20	612	2,27	615	2,18	
2	Sumergidas en agua	25	610	2,32	613	2,39	616	2,44	
3	Sumergidas en agua	25	611	2,22	614	2,48	617	2,38	
4	Ciclos de hielo-deshielo	0	491	2,47	494	2,60	497	2,60	
5	Ciclos de hielo-deshielo	0	492	2,43	495	2,42	498	2,48	
6	Ciclos de hielo-deshielo	0	493	2,50	496	2,43	499	2,53	
4	Ciclos de hielo-deshielo	7	543	2,53	546	2,50	549	2,68	
5	Ciclos de hielo-deshielo	7	544	2,50	547	2,31	550	2,42	
6	Ciclos de hielo-deshielo	7	545	2,58	548	2,44	551	2,68	
4	Ciclos de hielo-deshielo	14	578	2,61	581	2,34	584	2,46	
5	Ciclos de hielo-deshielo	14	579	2,42	582	2,43	585	2,45	
6	Ciclos de hielo-deshielo	14	580	2,44	583	2,45	586	2,48	
4	Ciclos de hielo-deshielo	25	618	2,33	620	2,35	623	2,32	
5	Ciclos de hielo-deshielo	25	622	2,42	-	-	-	-	
6	Ciclos de hielo-deshielo	25	619	2,30	621	2,33	624	2,45	

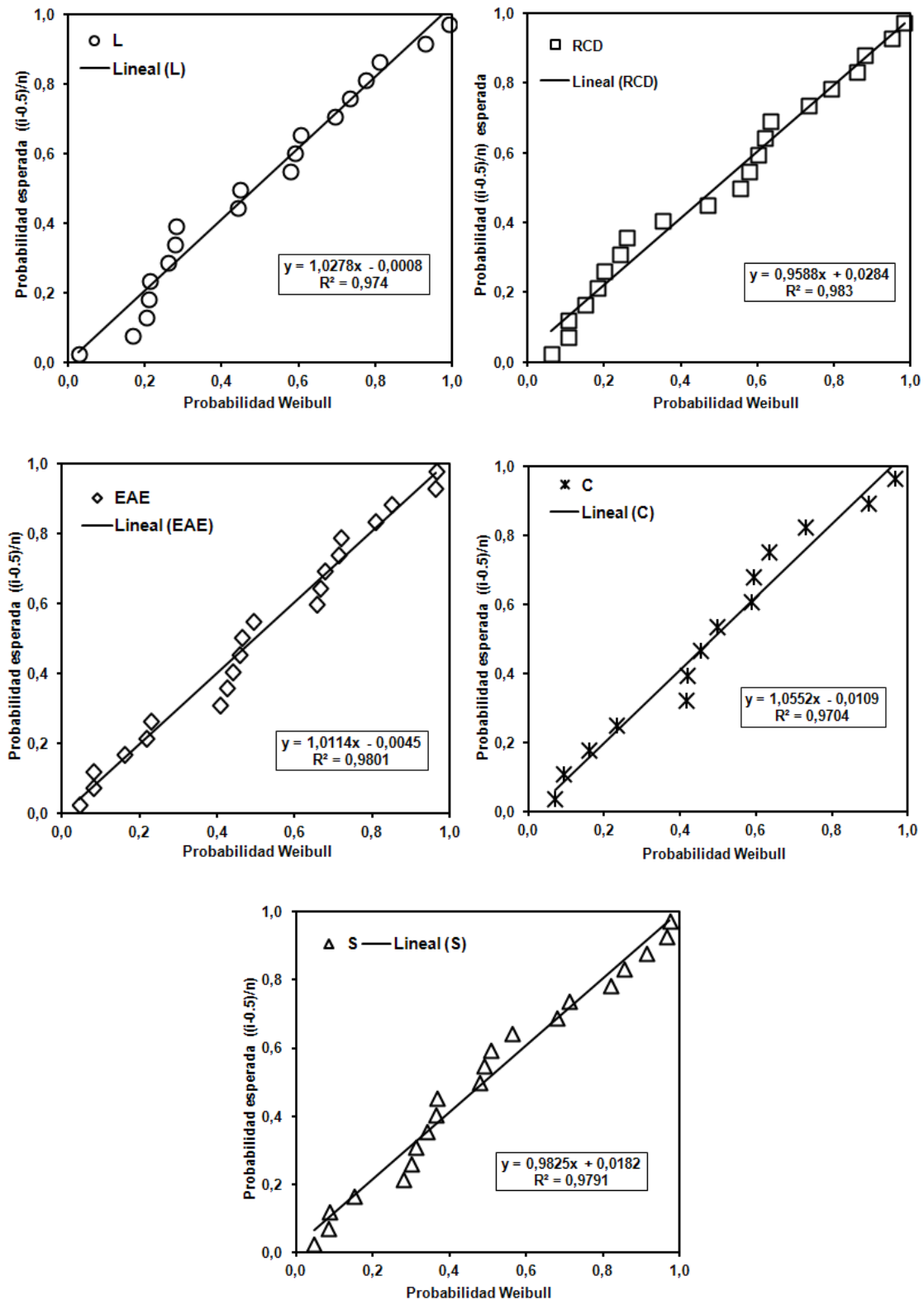
Gráficas de probabilidad-probabilidad normal de la resistencia a flexión y a compresión simple



Gráficas de probabilidad-probabilidad Lognormal de la conductividad térmica



Gráficas de probabilidad-probabilidad Weibull de la fuerza de adherencia



A3. RESULTADOS DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA REALIZADOS.

TRT	G ₁				G ₂				G ₃				G ₄			
Temperatura media del terreno	16,19				16,08				16,13				16,16			
Fecha	05/07/2011				11/07/2011				13/07/2011				19/07/2011			
Profundidad	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}
0	26,19	20,76	23,47	23,77	19,39	21,58	30,31	20,94	25,62	24,34	20,74	22,54	24,34	20,74	22,54	24,34
2	22,79	14,50	18,65	19,22	14,54	16,88	21,11	14,50	17,80	20,16	15,29	17,72	20,16	15,29	17,72	20,16
4	19,74	14,57	17,15	18,20	14,54	16,37	19,47	14,46	16,97	19,00	14,45	16,72	19,00	14,45	16,72	19,00
6	18,69	14,69	16,69	17,29	14,62	15,96	18,57	14,56	16,56	17,91	14,50	16,21	17,91	14,50	16,21	17,91
8	17,65	14,75	16,20	16,70	14,70	15,70	17,81	14,67	16,24	17,11	14,61	15,86	17,11	14,61	15,86	17,11
10	16,88	14,84	15,86	16,26	14,84	15,55	17,18	14,76	15,97	16,55	14,74	15,64	16,55	14,74	15,64	16,55
12	16,41	14,91	15,66	15,93	14,94	15,44	16,73	14,84	15,78	16,18	14,85	15,51	16,18	14,85	15,51	16,18
14	15,93	14,99	15,46	15,71	15,00	15,36	16,36	14,90	15,63	15,91	14,95	15,43	15,91	14,95	15,43	15,91
16	15,56	15,05	15,30	15,54	15,04	15,29	15,96	14,96	15,46	15,70	15,01	15,35	15,70	15,01	15,35	15,70
18	15,37	15,11	15,24	15,41	15,07	15,24	15,62	15,02	15,32	15,50	15,05	15,27	15,50	15,05	15,27	15,50
20	15,20	15,19	15,20	15,32	15,13	15,22	15,38	15,09	15,23	15,35	15,10	15,22	15,35	15,10	15,22	15,35
22	15,08	15,26	15,17	15,24	15,19	15,22	15,24	15,16	15,20	15,25	15,17	15,21	15,25	15,17	15,21	15,25
24	15,01	15,31	15,16	15,18	15,26	15,22	15,15	15,22	15,19	15,17	15,23	15,20	15,17	15,23	15,20	15,17
26	14,98	15,38	15,18	15,13	15,34	15,23	15,09	15,29	15,19	15,11	15,31	15,21	15,11	15,31	15,21	15,11
28	14,97	15,45	15,21	15,08	15,43	15,26	15,06	15,39	15,22	15,08	15,39	15,23	15,08	15,39	15,23	15,08
30	14,98	15,54	15,26	15,06	15,50	15,28	15,05	15,48	15,26	15,07	15,45	15,26	15,07	15,45	15,26	15,07
32	15,01	15,61	15,31	15,06	15,57	15,32	15,05	15,56	15,30	15,07	15,53	15,30	15,07	15,53	15,30	15,07
34	15,04	15,68	15,36	15,07	15,62	15,35	15,06	15,65	15,35	15,09	15,62	15,36	15,09	15,62	15,36	15,09
36	15,08	15,77	15,43	15,10	15,69	15,39	15,09	15,73	15,41	15,12	15,70	15,41	15,12	15,70	15,41	15,12
38	15,13	15,89	15,51	15,13	15,79	15,46	15,11	15,82	15,47	15,15	15,78	15,47	15,15	15,78	15,47	15,15
40	15,19	16,03	15,61	15,18	15,88	15,53	15,14	15,91	15,52	15,19	15,87	15,53	15,19	15,87	15,53	15,19
42	15,26	16,09	15,67	15,23	15,98	15,60	15,18	15,99	15,58	15,24	15,98	15,61	15,24	15,98	15,61	15,24
44	15,32	16,14	15,73	15,27	16,06	15,67	15,23	16,06	15,65	15,29	16,11	15,70	15,29	16,11	15,70	15,29
46	15,40	16,22	15,81	15,32	16,13	15,72	15,28	16,13	15,71	15,35	16,22	15,79	15,35	16,22	15,79	15,35
48	15,47	16,29	15,88	15,37	16,20	15,79	15,34	16,20	15,77	15,42	16,30	15,86	15,42	16,30	15,86	15,42
50	15,55	16,37	15,96	15,41	16,29	15,85	15,39	16,27	15,83	15,49	16,40	15,94	15,49	16,40	15,94	15,49

TRI Profundidad	G ₁			G ₂			G ₃			G ₄		
	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}	T _{descenso}	T _{ascenso}	T _{media}
52	15,62	16,47	16,05	15,46	16,39	15,93	15,46	16,37	15,91	15,56	16,48	16,02
54	15,69	16,56	16,13	15,52	16,47	16,00	15,52	16,46	15,99	15,63	16,56	16,09
56	15,76	16,65	16,21	15,58	16,53	16,06	15,58	16,55	16,07	15,70	16,63	16,17
58	15,84	16,74	16,29	15,65	16,59	16,12	15,65	16,62	16,13	15,78	16,69	16,24
60	15,91	16,80	16,35	15,72	16,67	16,20	15,72	16,69	16,21	15,86	16,75	16,31
62	15,97	16,85	16,41	15,81	16,75	16,28	15,80	16,75	16,27	15,94	16,82	16,38
64	16,05	16,92	16,48	15,89	16,82	16,35	15,87	16,82	16,35	16,02	16,90	16,46
66	16,13	16,98	16,55	15,97	16,88	16,42	15,94	16,89	16,41	16,10	16,97	16,54
68	16,19	17,05	16,62	16,07	16,94	16,51	16,01	16,95	16,48	16,18	17,03	16,60
70	16,26	17,10	16,68	16,15	17,02	16,58	16,08	17,05	16,57	16,26	17,09	16,68
72	16,33	17,14	16,74	16,25	17,10	16,67	16,14	17,16	16,65	16,35	17,15	16,75
74	16,40	17,21	16,80	16,34	17,15	16,75	16,21	17,21	16,71	16,43	17,20	16,82
76	16,48	17,25	16,87	16,41	17,20	16,80	16,29	17,25	16,77	16,51	17,25	16,88
78	16,57	17,30	16,93	16,48	17,26	16,87	16,37	17,29	16,83	16,59	17,30	16,95
80	16,64	17,33	16,99	16,54	17,32	16,93	16,44	17,33	16,88	16,69	17,34	17,01
82	16,71	17,35	17,03	16,61	17,36	16,99	16,52	17,37	16,94	16,77	17,38	17,07
84	16,78	17,40	17,09	16,68	17,41	17,05	16,61	17,40	17,01	16,83	17,43	17,13
86	16,84	17,44	17,14	16,76	17,45	17,11	16,68	17,44	17,06	16,90	17,47	17,19
88	16,90	17,47	17,18	16,84	17,49	17,17	16,74	17,47	17,11	16,97	17,50	17,24
90	16,95	17,49	17,22	16,91	17,53	17,22	16,81	17,49	17,15	17,05	17,53	17,29
92	17,00	17,50	17,25	16,97	17,55	17,26	16,88	17,50	17,19	17,12	17,55	17,33
94	17,05	17,52	17,28	17,05	17,57	17,31	16,95	17,50	17,23	17,18	17,56	17,37
96	17,36	17,52	17,44	17,19	17,49	17,34	17,35	17,35	17,35	17,46	17,57	17,51

A4. RESULTADOS DE LOS TESTS DE RESPUESTA TÉRMICA.

Test de respuesta térmica realizado sobre el relleno G₁

G ₁ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo							G ₁ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	T _m	Q	Q _{media}	DQ	T _a	DQ*	t(h)	T _m	Q	Q _{media}	DQ	T _a	DQ*
5,13	25,1	5466	5640	-174	17,4	-203	16,63	27,6	5718	5640	78	23,6	66
5,38	25,3	5494	5640	-146	16,9	-170	16,88	27,7	5787	5640	147	23,9	131
5,63	25,4	5519	5640	-122	16,4	-140	17,13	27,7	5760	5640	120	24,1	100
5,88	25,5	5478	5640	-162	16,1	-175	17,38	27,8	5779	5640	139	24,3	113
6,13	25,5	5468	5640	-172	16,0	-180	17,63	27,8	5779	5640	139	24,5	108
6,38	25,6	5463	5640	-178	15,8	-181	17,88	27,9	5808	5640	168	24,8	131
6,63	25,7	5478	5640	-163	15,7	-162	18,13	27,9	5798	5640	157	25,1	116
6,88	25,8	5477	5640	-163	15,6	-158	18,38	27,9	5870	5640	229	25,5	184
7,13	25,8	5525	5640	-115	15,5	-106	18,63	28,0	5848	5640	207	25,8	157
7,38	25,9	5539	5640	-101	15,5	-86	18,88	28,0	5815	5640	175	26,2	120
7,63	26,0	5579	5640	-61	15,4	-40	19,13	28,0	5728	5640	88	26,5	29
7,88	26,1	5615	5640	-25	15,2	2	19,38	28,0	5738	5640	98	26,9	37
8,13	26,1	5602	5640	-38	14,9	-6	19,63	28,0	5753	5640	113	27,2	50
8,38	26,2	5575	5640	-66	14,6	-31	19,88	28,0	5672	5640	32	27,5	-34
8,63	26,2	5601	5640	-39	14,3	-2	20,13	28,0	5647	5640	7	27,7	-62
8,88	26,3	5532	5640	-108	14,1	-70	20,38	28,0	5635	5640	-5	27,9	-77
9,13	26,3	5489	5640	-151	14,0	-111	20,63	28,0	5608	5640	-32	28,1	-109
9,38	26,3	5487	5640	-154	13,8	-113	20,88	28,1	5604	5640	-37	28,1	-117
9,63	26,3	5448	5640	-193	13,7	-151	21,13	28,1	5595	5640	-45	28,0	-130
9,88	26,3	5397	5640	-244	13,7	-202	21,38	28,1	5559	5640	-81	27,8	-170
10,13	26,3	5402	5640	-239	13,8	-196	21,63	28,1	5546	5640	-94	27,7	-188
10,38	26,3	5383	5640	-257	14,0	-211	21,88	28,1	5539	5640	-101	27,5	-199
10,63	26,4	5399	5640	-242	14,1	-192	22,13	28,2	5671	5640	30	27,2	-71
10,88	26,4	5376	5640	-265	14,5	-211	22,38	28,3	5788	5640	148	27,0	44
11,13	26,4	5365	5640	-275	15,1	-219	22,63	28,3	5773	5640	133	26,7	26
11,38	26,4	5390	5640	-250	15,7	-191	22,88	28,4	5823	5640	183	26,4	74
11,63	26,5	5489	5640	-151	16,3	-91	23,13	28,4	5837	5640	197	26,0	86
11,88	26,5	5414	5640	-226	16,9	-164	23,38	28,5	5819	5640	178	25,6	69
12,13	26,5	5396	5640	-245	17,5	-181	23,63	28,5	5796	5640	156	25,2	48
12,38	26,5	5374	5640	-266	18,0	-204	23,88	28,5	5799	5640	159	24,7	53
12,63	26,5	5330	5640	-310	18,6	-250	24,13	28,5	5806	5640	166	24,2	62
12,88	26,5	5284	5640	-357	18,9	-298	24,38	28,6	5793	5640	153	23,7	52
13,13	26,6	5413	5640	-228	19,0	-172	24,63	28,6	5766	5640	126	23,2	28
13,38	26,7	5456	5640	-184	19,1	-135	24,88	28,6	5809	5640	169	22,6	74
13,63	26,7	5495	5640	-145	19,2	-103	25,13	28,7	5849	5640	208	21,8	117
13,88	26,8	5570	5640	-71	19,4	-36	25,38	28,7	5879	5640	238	21,1	151
14,13	26,9	5634	5640	-6	19,7	21	25,63	28,7	5834	5640	193	20,3	111
14,38	27,1	5669	5640	29	20,1	50	25,88	28,7	5856	5640	216	19,7	138
14,63	27,1	5652	5640	12	20,4	27	26,13	28,7	5834	5640	194	19,2	121
14,88	27,2	5693	5640	52	20,8	60	26,38	28,7	5813	5640	172	18,7	106
15,13	27,3	5726	5640	86	21,3	88	26,63	28,6	5790	5640	150	18,2	89
15,38	27,3	5676	5640	35	21,7	36	26,88	28,6	5693	5640	53	17,7	-2
15,63	27,4	5682	5640	41	22,2	41	27,13	28,5	5681	5640	41	17,2	-7
15,88	27,4	5720	5640	80	22,6	78	27,38	28,6	5699	5640	59	16,7	20
16,13	27,5	5812	5640	172	22,9	168	27,63	28,6	5739	5640	99	16,2	69
16,38	27,5	5727	5640	87	23,3	79	27,88	28,6	5747	5640	107	15,8	86

G ₁ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo							G ₂ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	T _m	Q	Q _{media}	DQ	T _a	DQ*	t(h)	T _m	Q	Q _{media}	DQ	T _a	DQ*
28,13	28,6	5761	5640	120	15,4	108	39,63	29,0	5613	5640	-28	19,8	13
28,38	28,6	5774	5640	134	15,0	127	39,88	29,1	5725	5640	84	20,2	116
28,63	28,6	5775	5640	135	14,6	134	40,13	29,1	5699	5640	58	20,5	82
28,88	28,6	5738	5640	97	14,3	103	40,38	29,2	5695	5640	55	20,9	74
29,13	28,6	5757	5640	116	14,0	128	40,63	29,2	5747	5640	107	21,2	122
29,38	28,6	5808	5640	168	13,8	185	40,88	29,3	5753	5640	112	21,4	123
29,63	28,7	5800	5640	160	13,5	183	41,13	29,3	5759	5640	119	21,4	125
29,88	28,7	5785	5640	145	13,3	175	41,38	29,4	5760	5640	119	21,4	121
30,13	28,7	5768	5640	128	13,1	164	41,63	29,4	5808	5640	167	21,4	164
30,38	28,7	5801	5640	161	12,9	201	41,88	29,4	5817	5640	177	21,8	169
30,63	28,7	5827	5640	186	12,7	231	42,13	29,4	5746	5640	106	22,5	93
30,88	28,7	5832	5640	192	12,5	242	42,38	29,5	5796	5640	156	23,2	138
31,13	28,7	5788	5640	147	12,2	202	42,63	29,5	5828	5640	188	23,9	167
31,38	28,7	5814	5640	174	12,0	231	42,88	29,5	5675	5640	34	24,1	9
31,63	28,6	5767	5640	127	11,7	187	43,13	29,4	5698	5640	58	24,0	29
31,88	28,7	5751	5640	111	11,6	175	43,38	29,4	5560	5640	-80	23,8	-110
32,13	28,6	5765	5640	124	11,5	191	43,63	29,4	5565	5640	-75	23,7	-105
32,38	28,7	5764	5640	124	11,5	193	43,88	29,4	5558	5640	-82	23,5	-111
32,63	28,7	5788	5640	147	11,4	219	44,13	29,4	5618	5640	-22	23,4	-53
32,88	28,7	5636	5640	-4	11,3	70	44,38	29,4	5624	5640	-16	23,2	-54
33,13	28,6	5624	5640	-16	11,2	60	44,63	29,4	5620	5640	-20	23,1	-67
33,38	28,6	5647	5640	6	11,1	86	44,88	29,4	5590	5640	-50	22,9	-105
33,63	28,6	5667	5640	27	11,0	109	45,13	29,4	5555	5640	-85	22,8	-147
33,88	28,6	5564	5640	-76	11,0	9	45,38	29,4	5565	5640	-75	22,7	-136
34,13	28,5	5530	5640	-110	11,0	-22	45,63	29,4	5553	5640	-88	22,6	-147
34,38	28,5	5526	5640	-114	11,0	-25	45,88	29,4	5547	5640	-93	22,5	-151
34,63	28,5	5497	5640	-143	11,0	-54	46,13	29,4	5544	5640	-96	22,4	-152
34,88	28,5	5517	5640	-123	11,3	-33	46,38	29,4	5541	5640	-99	22,3	-153
35,13	28,5	5486	5640	-155	11,9	-64	46,63	29,4	5523	5640	-117	22,2	-170
35,38	28,5	5479	5640	-162	12,4	-70	46,88	29,4	5510	5640	-130	21,7	-181
35,63	28,5	5503	5640	-137	13,0	-44	47,13	29,4	5496	5640	-145	20,8	-193
35,88	28,5	5505	5640	-136	13,3	-42	47,38	29,4	5497	5640	-143	19,9	-190
36,13	28,5	5476	5640	-164	13,5	-69	47,63	29,4	5524	5640	-116	19,0	-163
36,38	28,5	5607	5640	-33	13,7	62	47,88	29,5	5583	5640	-57	18,5	-102
36,63	28,6	5610	5640	-30	13,9	65							
36,88	28,6	5614	5640	-27	14,4	69							
37,13	28,6	5624	5640	-16	15,2	78							
37,38	28,7	5593	5640	-47	15,9	41							
37,63	28,7	5582	5640	-58	16,7	24							
37,88	28,8	5612	5640	-28	17,2	47							
38,13	28,8	5585	5640	-55	17,5	14							
38,38	28,8	5594	5640	-47	17,9	20							
38,63	28,9	5556	5640	-84	18,2	-20							
38,88	28,9	5577	5640	-63	18,6	-2							
39,13	28,9	5548	5640	-92	19,0	-34							
39,38	29,0	5579	5640	-61	19,4	-11							

		G _i : Conductividad térmica del terreno sin corrección ambiental (W/(m K))																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	2,09	2,11	2,13	2,16	2,19	2,22	2,26	2,31	2,35	2,38	2,40	2,41	2,41	2,40	2,38	2,38	2,37	2,37	2,38	2,38
	6		2,07	2,10	2,13	2,16	2,20	2,25	2,31	2,35	2,39	2,41	2,42	2,42	2,40	2,39	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38
	7			2,05	2,09	2,13	2,17	2,23	2,29	2,35	2,39	2,41	2,42	2,42	2,40	2,39	2,38	2,37	2,37	2,38	2,38
	8				2,04	2,09	2,14	2,20	2,28	2,34	2,38	2,41	2,42	2,42	2,40	2,38	2,37	2,37	2,37	2,37	2,38
	9					2,04	2,10	2,17	2,25	2,32	2,37	2,40	2,42	2,41	2,40	2,37	2,36	2,36	2,36	2,37	2,37
	10						2,08	2,16	2,25	2,33	2,39	2,42	2,44	2,43	2,41	2,39	2,38	2,37	2,37	2,38	2,38
	11							2,20	2,31	2,40	2,46	2,50	2,52	2,50	2,47	2,44	2,43	2,42	2,42	2,42	2,43
	12								2,42	2,52	2,60	2,63	2,65	2,62	2,58	2,54	2,52	2,51	2,50	2,50	2,50
	13									2,75	2,83	2,87	2,87	2,83	2,77	2,70	2,67	2,65	2,63	2,63	2,63
	14										3,18	3,21	3,20	3,12	3,02	2,92	2,86	2,83	2,80	2,79	2,78
	15											3,57	3,53	3,40	3,25	3,11	3,03	2,98	2,95	2,92	2,91
	16												3,89	3,69	3,48	3,29	3,19	3,12	3,07	3,04	3,01
	17													3,98	3,69	3,45	3,31	3,22	3,16	3,12	3,08
	18														3,86	3,55	3,39	3,28	3,20	3,15	3,11
	19															3,60	3,42	3,29	3,21	3,15	3,11
	20																3,46	3,32	3,22	3,16	3,11
	21																	3,40	3,28	3,21	3,15
	22																		3,40	3,31	3,23
	23																			3,31	3,22
	24																				3,09

		G _i : Conductividad térmica del terreno tras corrección (W/(m K))																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	2,28	2,26	2,24	2,23	2,21	2,21	2,21	2,22	2,23	2,23	2,22	2,22	2,21	2,20	2,19	2,20	2,21	2,22	2,24	2,26
	6		2,30	2,28	2,26	2,24	2,23	2,24	2,25	2,26	2,25	2,24	2,24	2,23	2,21	2,21	2,21	2,22	2,24	2,26	2,28
	7			2,30	2,27	2,25	2,24	2,24	2,26	2,26	2,26	2,25	2,24	2,23	2,22	2,21	2,21	2,22	2,24	2,27	2,29
	8				2,26	2,24	2,23	2,23	2,25	2,26	2,25	2,24	2,23	2,22	2,21	2,19	2,20	2,21	2,24	2,26	2,28
	9					2,19	2,19	2,19	2,21	2,22	2,22	2,21	2,20	2,19	2,18	2,16	2,17	2,19	2,21	2,24	2,27
	10						2,15	2,16	2,18	2,19	2,19	2,18	2,18	2,16	2,15	2,14	2,15	2,17	2,19	2,22	2,25
	11							2,15	2,18	2,20	2,19	2,18	2,18	2,16	2,14	2,13	2,14	2,16	2,19	2,23	2,26
	12								2,20	2,21	2,21	2,20	2,19	2,17	2,15	2,14	2,15	2,17	2,21	2,24	2,28
	13									2,25	2,25	2,23	2,22	2,20	2,17	2,16	2,17	2,19	2,23	2,27	2,31
	14										2,29	2,27	2,25	2,22	2,20	2,18	2,19	2,22	2,26	2,30	2,34
	15											2,26	2,25	2,21	2,19	2,17	2,18	2,21	2,25	2,30	2,35
	16												2,23	2,19	2,16	2,14	2,16	2,19	2,24	2,30	2,34
	17													2,14	2,11	2,10	2,12	2,15	2,21	2,27	2,32
	18														2,04	2,02	2,05	2,09	2,15	2,22	2,28
	19															1,95	1,98	2,03	2,09	2,17	2,23
	20																1,94	1,99	2,06	2,14	2,21
	21																	1,98	2,06	2,15	2,23
	22																		2,11	2,22	2,30
	23																			2,29	2,39
	24																				2,47

G ₁ : Resistencia térmica de la perforación sin corrección ambiental ((m K)/W)		Tiempo final del intervalo (h)																			
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
5	0,0548	0,0557	0,0569	0,0582	0,0597	0,0617	0,0641	0,0667	0,0689	0,0705	0,0714	0,0719	0,0716	0,0710	0,0710	0,0702	0,0699	0,0698	0,0699	0,0701	0,0703
6		0,0528	0,0543	0,0560	0,0578	0,0603	0,0631	0,0662	0,0688	0,0706	0,0716	0,0722	0,0719	0,0712	0,0712	0,0702	0,0699	0,0698	0,0699	0,0701	0,0704
7			0,0508	0,0530	0,0553	0,0582	0,0616	0,0652	0,0683	0,0703	0,0715	0,0722	0,0719	0,0710	0,0710	0,0700	0,0696	0,0695	0,0696	0,0699	0,0701
8				0,0493	0,0521	0,0557	0,0598	0,0640	0,0675	0,0699	0,0713	0,0721	0,0717	0,0707	0,0707	0,0696	0,0692	0,0691	0,0692	0,0695	0,0698
9					0,0483	0,0526	0,0574	0,0624	0,0665	0,0693	0,0709	0,0718	0,0714	0,0703	0,0703	0,0690	0,0686	0,0685	0,0686	0,0690	0,0693
10						0,0508	0,0564	0,0622	0,0669	0,0700	0,0718	0,0728	0,0723	0,0710	0,0695	0,0689	0,0689	0,0690	0,0694	0,0698	
11							0,0587	0,0651	0,0703	0,0737	0,0756	0,0765	0,0758	0,0742	0,0724	0,0718	0,0715	0,0715	0,0716	0,0719	0,0722
12								0,0712	0,0768	0,0803	0,0821	0,0829	0,0817	0,0797	0,0775	0,0766	0,0761	0,0760	0,0762	0,0764	
13									0,0872	0,0906	0,0921	0,0925	0,0907	0,0881	0,0852	0,0839	0,0831	0,0826	0,0826	0,0826	
14										0,1035	0,1044	0,1042	0,1016	0,0981	0,0944	0,0925	0,0913	0,0904	0,0901	0,0898	
15											0,1150	0,1142	0,1108	0,1064	0,1018	0,0994	0,0976	0,0965	0,0959	0,0953	
16												0,1232	0,1188	0,1134	0,1080	0,1049	0,1027	0,1012	0,1003	0,0995	
17													0,1256	0,1192	0,1128	0,1091	0,1064	0,1045	0,1034	0,1024	
18														0,1233	0,1159	0,1116	0,1085	0,1063	0,1049	0,1037	
19															0,1176	0,1126	0,1091	0,1066	0,1051	0,1037	
20																0,1140	0,1100	0,1071	0,1054	0,1039	
21																	0,1124	0,1091	0,1070	0,1052	
22																		0,1126	0,1101	0,1080	
23																			0,1102	0,1078	
24																				0,1030	

G _t : Resistencia térmica de la perforación tras corrección ((m K)/W)																							
Tiempo inicial del intervalo (h)		Tiempo final del intervalo (h)																					
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
5		0,0638	0,0631	0,0621	0,0612	0,0604	0,0602	0,0604	0,0610	0,0614	0,0613	0,0610	0,0607	0,0601	0,0596	0,0592	0,0595	0,0600	0,0609	0,0620	0,0629		
6			0,0656	0,0644	0,0632	0,0622	0,0618	0,0620	0,0627	0,0630	0,0628	0,0624	0,0621	0,0614	0,0607	0,0602	0,0605	0,0611	0,0621	0,0633	0,0643		
7				0,0653	0,0639	0,0627	0,0622	0,0625	0,0632	0,0636	0,0633	0,0629	0,0624	0,0616	0,0609	0,0603	0,0606	0,0613	0,0624	0,0638	0,0649		
8					0,0633	0,0619	0,0614	0,0617	0,0626	0,0631	0,0628	0,0623	0,0618	0,0610	0,0601	0,0594	0,0599	0,0607	0,0620	0,0635	0,0648		
9						0,0591	0,0587	0,0592	0,0603	0,0610	0,0608	0,0602	0,0598	0,0589	0,0580	0,0573	0,0579	0,0588	0,0603	0,0621	0,0636		
10							0,0560	0,0567	0,0581	0,0590	0,0588	0,0583	0,0579	0,0569	0,0560	0,0553	0,0560	0,0571	0,0589	0,0609	0,0626		
11								0,0564	0,0580	0,0591	0,0588	0,0583	0,0578	0,0567	0,0557	0,0549	0,0557	0,0570	0,0589	0,0612	0,0630		
12									0,0592	0,0603	0,0600	0,0593	0,0587	0,0575	0,0563	0,0554	0,0563	0,0577	0,0598	0,0623	0,0643		
13										0,0631	0,0626	0,0616	0,0608	0,0593	0,0579	0,0569	0,0578	0,0593	0,0616	0,0643	0,0664		
14											0,0653	0,0641	0,0631	0,0613	0,0596	0,0583	0,0593	0,0609	0,0634	0,0663	0,0686		
15												0,0639	0,0627	0,0607	0,0588	0,0574	0,0586	0,0604	0,0632	0,0664	0,0689		
16													0,0613	0,0591	0,0571	0,0557	0,0570	0,0591	0,0623	0,0659	0,0687		
17														0,0554	0,0534	0,0520	0,0537	0,0562	0,0599	0,0640	0,0672		
18															0,0474	0,0462	0,0484	0,0515	0,0558	0,0605	0,0642		
19																0,0394	0,0423	0,0461	0,0512	0,0567	0,0610		
20																	0,0380	0,0424	0,0483	0,0546	0,0595		
21																		0,0418	0,0484	0,0554	0,0608		
22																			0,0528	0,0603	0,0660		
23																				0,0655	0,0715		
24																					0,0764		

INFLUENCIA DEL TIPO DE ÁRIDO EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS UTILIZADOS COMO RELLENO GEOTÉRMICO

		G ₁ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste sin corrección ambiental (-)																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	6		0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96
	7			0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,93	0,93	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95
	8				0,96	0,95	0,95	0,94	0,92	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94
	9					0,95	0,94	0,93	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93
	10						0,93	0,92	0,90	0,88	0,88	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,93
	11							0,90	0,88	0,86	0,86	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91
	12								0,85	0,84	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88	0,89	0,89	0,90	0,90
	13									0,81	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90
	14										0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89
	15											0,78	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88
	16												0,77	0,79	0,80	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86
	17													0,75	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,84
	18														0,72	0,73	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82
	19															0,69	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80
	20																0,68	0,71	0,73	0,76	0,77
	21																	0,67	0,70	0,72	0,74
	22																		0,65	0,68	0,71
	23																			0,65	0,68
	24																				0,66

		G ₁ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste tras corrección (-)																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	6		0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
	7			0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98
	8				0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	9					0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	10						0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97
	11							0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97
	12								0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97
	13									0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96
	14										0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96
	15											0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95
	16												0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94
	17													0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,94
	18														0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93
	19															0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93
	20																0,97	0,96	0,95	0,93	0,92
	21																	0,95	0,94	0,92	0,91
	22																		0,93	0,91	0,90
	23																			0,90	0,89
	24																				0,87

Test de respuesta térmica realizado sobre el relleno G₁

G₂: Potencia térmica inyectada durante el ensayo

t(h)	Tm	Q	Q_media	DQ	Ta	DQ*
5,13	25,9	5745	5695	50	22,5	-34
5,38	26,0	5700	5695	5	22,1	-79
5,63	26,1	5686	5695	-9	21,6	-94
5,88	26,2	5705	5695	10	21,2	-77
6,13	26,3	5726	5695	31	20,8	-58
6,38	26,4	5744	5695	49	20,5	-42
6,63	26,5	5768	5695	73	20,2	-18
6,88	26,7	5782	5695	87	19,9	-2
7,13	26,7	5764	5695	69	19,7	-17
7,38	26,8	5734	5695	39	19,5	-45
7,63	26,9	5745	5695	50	19,3	-32
7,88	26,9	5712	5695	17	19,1	-62
8,13	27,0	5778	5695	83	18,6	7
8,38	27,0	5708	5695	13	17,9	-60
8,63	27,1	5668	5695	-27	17,2	-97
8,88	27,1	5740	5695	46	16,5	-17
9,13	27,2	5846	5695	151	15,9	97
9,38	27,3	5854	5695	159	15,4	113
9,63	27,4	5854	5695	159	14,9	120
9,88	27,5	5846	5695	151	14,4	118
10,13	27,5	5718	5695	24	14,1	-4
10,38	27,5	5585	5695	-110	14,0	-132
10,63	27,4	5568	5695	-127	13,8	-144
10,88	27,4	5490	5695	-205	13,7	-218
11,13	27,5	5492	5695	-203	13,4	-212
11,38	27,5	5514	5695	-181	13,0	-187
11,63	27,5	5529	5695	-166	12,6	-167
11,88	27,5	5474	5695	-221	12,2	-210
12,13	27,6	5523	5695	-172	11,9	-149
12,38	27,6	5522	5695	-173	11,8	-137
12,63	27,6	5558	5695	-137	11,7	-89
12,88	27,7	5512	5695	-183	11,6	-125
13,13	27,7	5528	5695	-167	11,5	-101
13,38	27,8	5510	5695	-185	11,4	-110
13,63	27,8	5515	5695	-180	11,3	-97
13,88	27,8	5506	5695	-188	11,2	-102
14,13	27,9	5504	5695	-190	11,1	-101
14,38	27,9	5535	5695	-160	11,0	-68
14,63	27,9	5574	5695	-121	10,8	-25
14,88	28,0	5528	5695	-167	10,7	-65
15,13	28,0	5585	5695	-110	10,5	-1
15,38	28,1	5586	5695	-109	10,4	8
15,63	28,1	5625	5695	-69	10,2	54
15,88	28,2	5580	5695	-114	10,1	11
16,13	28,2	5617	5695	-78	10,1	49
16,38	28,2	5603	5695	-92	10,2	37

G₂: Potencia térmica inyectada durante el ensayo

t(h)	Tm	Q	Q_media	DQ	Ta	DQ*
16,63	28,3	5560	5695	-135	10,4	-4
16,88	28,2	5485	5695	-210	10,5	-77
17,13	28,3	5563	5695	-132	10,9	2
17,38	28,3	5661	5695	-34	11,4	102
17,63	28,4	5589	5695	-106	12,0	32
17,88	28,4	5537	5695	-158	12,5	-17
18,13	28,4	5558	5695	-137	13,0	6
18,38	28,4	5516	5695	-179	13,5	-33
18,63	28,4	5489	5695	-206	13,9	-56
18,88	28,5	5467	5695	-228	14,4	-76
19,13	28,4	5394	5695	-301	14,9	-146
19,38	28,4	5417	5695	-278	15,4	-120
19,63	28,4	5408	5695	-287	16,0	-127
19,88	28,4	5376	5695	-319	16,5	-162
20,13	28,5	5503	5695	-192	17,2	-38
20,38	28,5	5408	5695	-286	17,8	-135
20,63	28,5	5465	5695	-230	18,5	-82
20,88	28,5	5557	5695	-138	19,1	1
21,13	28,5	5596	5695	-99	19,7	30
21,38	28,5	5543	5695	-152	20,2	-33
21,63	28,6	5522	5695	-173	20,7	-64
21,88	28,6	5494	5695	-201	21,2	-100
22,13	28,7	5549	5695	-146	21,7	-53
22,38	28,7	5568	5695	-127	22,2	-43
22,63	28,8	5642	5695	-53	22,8	23
22,88	28,9	5660	5695	-35	23,3	31
23,13	29,0	5682	5695	-12	23,8	44
23,38	29,0	5694	5695	-1	24,2	45
23,63	29,1	5722	5695	27	24,6	63
23,88	29,1	5702	5695	7	25,0	32
24,13	29,1	5722	5695	27	25,4	40
24,38	29,2	5746	5695	51	25,9	53
24,63	29,3	5810	5695	115	26,3	105
24,88	29,3	5774	5695	79	26,8	60
25,13	29,3	5690	5695	-5	27,3	-33
25,38	29,3	5681	5695	-14	27,8	-51
25,63	29,4	5725	5695	30	28,3	-16
25,88	29,4	5729	5695	34	28,8	-21
26,13	29,4	5752	5695	57	29,1	-8
26,38	29,5	5761	5695	66	29,4	-10
26,63	29,5	5764	5695	70	29,6	-16
26,88	29,5	5700	5695	5	29,9	-87
27,13	29,5	5720	5695	25	29,9	-75
27,38	29,6	5746	5695	51	29,8	-56
28,13	29,6	5732	5695	37	29,5	-94
28,38	29,6	5777	5695	82	29,3	-56

G ₂ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	Tm	Q	Q_medía	DQ	Ta	DQ*
28,63	29,6	5721	5695	26	29,1	-121
28,88	29,7	5712	5695	17	28,9	-139
29,13	29,8	5751	5695	57	28,5	-108
29,38	29,9	5791	5695	96	28,1	-78
29,63	29,9	5833	5695	138	27,6	-44
29,88	30,0	5853	5695	158	27,2	-29
30,13	30,0	5837	5695	142	26,7	-50
30,38	30,0	5903	5695	209	26,3	13
30,63	30,0	5914	5695	219	25,8	20
30,88	30,0	5933	5695	238	25,4	40
31,13	30,0	5947	5695	252	24,8	55
31,38	30,1	5963	5695	268	24,1	73
31,63	30,1	5926	5695	231	23,4	38
31,88	30,1	5929	5695	234	22,7	45
32,13	30,1	5954	5695	259	22,1	73
32,38	30,1	5900	5695	205	21,6	23
32,63	30,0	5776	5695	81	21,1	-97
32,88	29,9	5766	5695	71	20,6	-99
33,13	29,9	5857	5695	163	20,2	0
33,38	29,9	5843	5695	148	19,9	-6
33,63	29,9	5883	5695	188	19,5	42
33,88	29,9	5844	5695	149	19,2	11
34,13	30,0	5858	5695	163	18,8	33
34,38	30,0	5860	5695	165	18,5	44
34,63	30,0	5888	5695	193	18,1	80
34,88	30,0	5792	5695	98	17,8	-3
39,13	30,3	5714	5695	19	13,1	60
39,38	30,3	5706	5695	11	13,0	61
39,63	30,2	5631	5695	-64	12,9	-5
39,88	30,2	5596	5695	-99	12,8	-34
40,13	30,1	5589	5695	-106	12,9	-36
40,38	30,1	5573	5695	-122	13,1	-46
40,63	30,1	5562	5695	-133	13,3	-52
40,88	30,1	5449	5695	-246	13,5	-164
41,13	30,1	5562	5695	-133	13,9	-49
41,38	30,1	5670	5695	-25	14,5	61
41,63	30,1	5663	5695	-32	15,1	56
41,88	30,1	5661	5695	-34	15,7	57
42,13	30,2	5686	5695	-9	16,3	87
42,38	30,2	5696	5695	1	16,8	100
42,63	30,2	5688	5695	-7	17,3	95

G ₂ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	Tm	Q	Q_medía	DQ	Ta	DQ*
42,88	30,2	5696	5695	1	17,8	105
43,13	30,2	5676	5695	-18	18,3	87
43,38	30,2	5672	5695	-23	18,8	85
43,63	30,2	5655	5695	-40	19,3	69
43,88	30,2	5700	5695	5	19,8	110
44,13	30,3	5682	5695	-13	20,2	89
44,38	30,3	5671	5695	-23	20,6	75
44,63	30,3	5698	5695	3	21,0	97
44,88	30,3	5706	5695	11	21,4	95
45,13	30,4	5729	5695	34	21,8	106
45,38	30,4	5724	5695	29	22,1	91
45,63	30,4	5706	5695	11	22,4	63
45,88	30,4	5778	5695	83	22,7	126
46,13	30,4	5770	5695	75	23,0	108
46,38	30,5	5757	5695	62	23,4	86
46,63	30,5	5765	5695	71	23,8	86
46,88	30,5	5787	5695	92	24,2	98
47,13	30,6	5777	5695	82	24,5	80
47,38	30,6	5812	5695	118	24,6	106
47,63	30,6	5827	5695	132	24,8	112
47,88	30,6	5830	5695	136	24,9	108

		G ₂ : Conductividad térmica del terreno sin corrección ambiental (W/(m K))																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	2,27	2,22	2,18	2,15	2,13	2,13	2,13	2,13	2,14	2,14	2,13	2,13	2,15	2,16	2,17	2,19	2,20	2,20	2,20	2,21
	6		2,22	2,17	2,13	2,11	2,11	2,11	2,12	2,12	2,12	2,12	2,13	2,15	2,16	2,18	2,19	2,20	2,20	2,20	2,20
	7			2,13	2,09	2,07	2,07	2,08	2,08	2,09	2,09	2,08	2,09	2,10	2,12	2,14	2,16	2,17	2,18	2,18	2,18
	8				2,03	2,01	2,02	2,02	2,03	2,04	2,04	2,04	2,05	2,06	2,09	2,11	2,12	2,14	2,15	2,16	2,16
	9					1,95	1,96	1,97	1,98	1,99	1,99	2,00	2,00	2,03	2,05	2,07	2,10	2,11	2,12	2,13	2,13
	10						1,87	1,89	1,90	1,92	1,93	1,93	1,94	1,97	2,00	2,02	2,05	2,07	2,08	2,09	2,10
	11							1,82	1,84	1,86	1,87	1,88	1,89	1,92	1,96	1,99	2,01	2,04	2,05	2,06	2,07
	12								1,80	1,83	1,84	1,85	1,87	1,90	1,94	1,97	2,00	2,03	2,05	2,06	2,07
	13									1,80	1,82	1,83	1,85	1,89	1,93	1,96	2,00	2,03	2,05	2,06	2,07
	14										1,80	1,81	1,83	1,88	1,92	1,96	2,00	2,03	2,05	2,07	2,08
	15											1,79	1,82	1,87	1,92	1,96	2,00	2,04	2,06	2,08	2,09
	16												1,79	1,85	1,90	1,95	2,00	2,04	2,06	2,08	2,09
	17													1,83	1,89	1,95	2,00	2,04	2,07	2,09	2,10
	18														1,89	1,95	2,01	2,05	2,08	2,10	2,11
	19															1,97	2,03	2,08	2,11	2,14	2,15
	20																2,11	2,17	2,20	2,22	2,23
	21																	2,30	2,33	2,35	2,35
	22																		2,56	2,56	2,55
	23																			2,80	2,77
	24																				2,98

		G ₂ : Conductividad térmica del terreno tras corrección (W/(m K))																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	2,11	2,11	2,11	2,10	2,11	2,13	2,14	2,15	2,15	2,14	2,13	2,12	2,12	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
	6		2,12	2,12	2,12	2,12	2,14	2,16	2,16	2,16	2,16	2,14	2,13	2,13	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
	7			2,12	2,12	2,13	2,15	2,16	2,17	2,17	2,16	2,15	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
	8				2,11	2,12	2,14	2,16	2,17	2,17	2,16	2,14	2,13	2,13	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
	9					2,12	2,15	2,17	2,18	2,18	2,17	2,14	2,13	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
	10						2,13	2,15	2,16	2,16	2,15	2,13	2,12	2,12	2,13	2,13	2,13	2,13	2,12	2,12	2,13
	11							2,14	2,16	2,16	2,14	2,12	2,11	2,11	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
	12								2,19	2,19	2,17	2,14	2,13	2,13	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14
	13									2,23	2,21	2,18	2,16	2,16	2,17	2,17	2,17	2,16	2,16	2,16	2,16
	14										2,25	2,20	2,18	2,18	2,19	2,18	2,18	2,18	2,17	2,17	2,17
	15											2,22	2,19	2,19	2,20	2,20	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18
	16												2,18	2,18	2,19	2,19	2,19	2,18	2,17	2,17	2,17
	17													2,15	2,16	2,16	2,16	2,16	2,15	2,15	2,15
	18														2,13	2,13	2,14	2,13	2,12	2,12	2,12
	19															2,10	2,11	2,11	2,10	2,10	2,10
	20																2,11	2,11	2,10	2,10	2,10
	21																	2,12	2,11	2,11	2,11
	22																		2,16	2,15	2,15
	23																			2,18	2,18
	24																				2,16

G ₂ : Resistencia térmica de la perforación sin corrección ambiental ((m K)/W)																							
		Tiempo final del intervalo (h)																					
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	0,0797	0,0771	0,0746	0,0723	0,0710	0,0707	0,0706	0,0705	0,0704	0,0703	0,0699	0,0701	0,0709	0,0718	0,0726	0,0733	0,0739	0,0742	0,0743	0,0743		
	6		0,0768	0,0738	0,0712	0,0697	0,0694	0,0693	0,0693	0,0693	0,0692	0,0688	0,0690	0,0700	0,0711	0,0719	0,0728	0,0735	0,0738	0,0740	0,0740		
	7			0,0715	0,0686	0,0669	0,0667	0,0667	0,0668	0,0669	0,0669	0,0665	0,0668	0,0680	0,0693	0,0704	0,0714	0,0722	0,0726	0,0729	0,0729		
	8				0,0641	0,0624	0,0624	0,0626	0,0629	0,0632	0,0633	0,0630	0,0635	0,0650	0,0666	0,0678	0,0691	0,0701	0,0706	0,0709	0,0710		
	9					0,0575	0,0578	0,0583	0,0588	0,0593	0,0596	0,0594	0,0602	0,0619	0,0639	0,0654	0,0669	0,0681	0,0687	0,0691	0,0693		
	10						0,0506	0,0515	0,0525	0,0534	0,0540	0,0541	0,0551	0,0573	0,0596	0,0615	0,0633	0,0648	0,0656	0,0662	0,0665		
	11							0,0450	0,0465	0,0478	0,0488	0,0491	0,0505	0,0532	0,0560	0,0582	0,0604	0,0621	0,0631	0,0639	0,0642		
	12								0,0426	0,0443	0,0456	0,0461	0,0478	0,0509	0,0542	0,0567	0,0592	0,0612	0,0624	0,0632	0,0637		
	13									0,0413	0,0429	0,0436	0,0457	0,0493	0,0530	0,0559	0,0587	0,0609	0,0623	0,0632	0,0637		
	14										0,0404	0,0413	0,0437	0,0479	0,0521	0,0554	0,0586	0,0610	0,0625	0,0636	0,0641		
	15											0,0390	0,0418	0,0466	0,0514	0,0551	0,0586	0,0614	0,0630	0,0641	0,0647		
	16												0,0389	0,0444	0,0499	0,0542	0,0582	0,0612	0,0631	0,0643	0,0649		
	17													0,0421	0,0484	0,0533	0,0578	0,0612	0,0632	0,0646	0,0652		
	18														0,0477	0,0532	0,0582	0,0620	0,0642	0,0657	0,0663		
	19															0,0545	0,0601	0,0642	0,0665	0,0680	0,0686		
	20																0,0660	0,0703	0,0725	0,0738	0,0742		
	21																	0,0794	0,0814	0,0823	0,0823		
	22																		0,0947	0,0949	0,0941		
	23																			0,1067	0,1051		
	24																				0,1141		

G ₂ : Resistencia térmica de la perforación tras corrección ((m K)/W)																							
Tiempo inicial del intervalo (h)		Tiempo final del intervalo (h)																					
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
	5	0,0680	0,0678	0,0676	0,0675	0,0679	0,0689	0,0696	0,0700	0,0700	0,0697	0,0690	0,0686	0,0687	0,0689	0,0690	0,0690	0,0690	0,0689	0,0689	0,0689	0,0689	
	6		0,0688	0,0686	0,0684	0,0688	0,0699	0,0708	0,0712	0,0712	0,0707	0,0699	0,0694	0,0695	0,0697	0,0698	0,0698	0,0698	0,0696	0,0696	0,0696	0,0696	
	7			0,0688	0,0686	0,0690	0,0704	0,0713	0,0718	0,0717	0,0712	0,0702	0,0696	0,0697	0,0700	0,0700	0,0701	0,0700	0,0698	0,0698	0,0698	0,0698	
	8				0,0680	0,0685	0,0701	0,0712	0,0717	0,0717	0,0711	0,0699	0,0693	0,0695	0,0698	0,0698	0,0699	0,0698	0,0696	0,0696	0,0696	0,0696	
	9					0,0686	0,0704	0,0717	0,0723	0,0722	0,0715	0,0702	0,0694	0,0696	0,0699	0,0700	0,0700	0,0700	0,0697	0,0697	0,0697	0,0697	
	10						0,0689	0,0704	0,0712	0,0711	0,0704	0,0689	0,0681	0,0683	0,0688	0,0689	0,0690	0,0689	0,0687	0,0687	0,0687	0,0687	
	11							0,0699	0,0708	0,0708	0,0700	0,0683	0,0674	0,0677	0,0683	0,0684	0,0685	0,0685	0,0682	0,0682	0,0682	0,0683	
	12								0,0733	0,0731	0,0721	0,0701	0,0690	0,0693	0,0698	0,0699	0,0700	0,0699	0,0696	0,0695	0,0695	0,0696	
	13									0,0762	0,0748	0,0724	0,0711	0,0713	0,0718	0,0718	0,0718	0,0716	0,0712	0,0711	0,0711	0,0711	
	14										0,0770	0,0742	0,0726	0,0728	0,0733	0,0731	0,0731	0,0729	0,0723	0,0722	0,0722	0,0721	
	15											0,0752	0,0734	0,0735	0,0741	0,0739	0,0738	0,0735	0,0729	0,0727	0,0726	0,0726	
	16												0,0726	0,0728	0,0734	0,0732	0,0732	0,0729	0,0722	0,0720	0,0719	0,0719	
	17													0,0706	0,0714	0,0714	0,0714	0,0711	0,0705	0,0703	0,0703	0,0703	
	18														0,0691	0,0692	0,0694	0,0692	0,0685	0,0685	0,0686	0,0686	
	19															0,0670	0,0673	0,0672	0,0666	0,0666	0,0668	0,0668	
	20																0,0673	0,0672	0,0665	0,0666	0,0666	0,0668	
	21																	0,0681	0,0673	0,0673	0,0675	0,0675	
	22																		0,0711	0,0709	0,0709	0,0709	
	23																			0,0727	0,0726	0,0726	
	24																					0,0717	

INFLUENCIA DEL TIPO DE ÁRIDO EN LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y MECÁNICAS DE MORTEROS UTILIZADOS COMO RELLENO GEOTÉRMICO

		G ₂ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste sin corrección ambiental (-)																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	6		0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
	7			0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
	8				0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
	9					0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97
	10						0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
	11							0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	12								0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	13									0,96	0,96	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	14										0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
	15											0,96	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94
	16												0,95	0,94	0,93	0,93	0,93	0,92	0,93	0,93	0,93
	17													0,94	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92
	18														0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91
	19															0,89	0,88	0,88	0,89	0,89	0,90
	20																0,86	0,86	0,87	0,88	0,88
	21																	0,85	0,85	0,86	0,87
	22																		0,85	0,86	0,87
	23																			0,85	0,87
	24																				0,86

		G ₂ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste tras corrección (-)																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
	6		0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	7			0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	8				0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	9					0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	10						0,99	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	11							0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	12								0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	13									0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
	14										0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99
	15											0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	16												0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	17													0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
	18														0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
	19															0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98
	20																0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
	21																	0,96	0,97	0,97	0,97
	22																		0,96	0,97	0,97
	23																			0,96	0,96
	24																				0,96

Test de Respuesta térmica realizado sobre el relleno G₃

G ₃ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	Tm	Q	Q_medio	DQ	Ta	DQ*
5,13	25,6	5713	5593	120	18,4	50
5,38	25,8	5701	5593	108	18,1	42
5,63	25,9	5692	5593	99	17,7	34
5,88	26,0	5663	5593	70	17,4	4
6,13	26,0	5674	5593	81	17,0	15
6,38	26,1	5683	5593	90	16,7	24
6,63	26,2	5712	5593	119	16,3	50
6,88	26,2	5660	5593	67	16,0	-4
7,13	26,3	5633	5593	40	15,6	-34
7,38	26,3	5525	5593	-68	15,3	-138
7,63	26,3	5583	5593	-10	14,9	-69
7,88	26,4	5620	5593	27	14,6	-22
8,13	26,4	5658	5593	65	14,3	26
8,38	26,5	5641	5593	48	14,2	17
8,63	26,6	5675	5593	82	14,0	59
8,88	26,7	5731	5593	138	13,9	123
9,13	26,8	5715	5593	122	13,7	115
9,38	26,8	5698	5593	106	13,6	106
9,63	26,9	5673	5593	80	13,4	88
9,88	26,9	5719	5593	126	13,3	141
10,13	27,0	5734	5593	141	13,1	164
10,38	27,1	5717	5593	124	12,9	154
10,63	27,1	5664	5593	71	12,7	110
10,88	27,1	5533	5593	-60	12,5	-14
11,13	27,1	5510	5593	-83	12,3	-29
11,38	27,1	5494	5593	-99	12,1	-40
11,63	27,2	5512	5593	-81	11,9	-19
11,88	27,2	5475	5593	-118	11,7	-52
12,13	27,2	5427	5593	-166	11,4	-96
12,38	27,2	5393	5593	-200	10,9	-127
12,63	27,2	5466	5593	-127	10,5	-51
12,88	27,2	5423	5593	-170	10,0	-91
13,13	27,2	5444	5593	-149	9,8	-66
13,38	27,3	5422	5593	-171	9,8	-84
13,63	27,3	5441	5593	-152	9,8	-62
13,88	27,3	5426	5593	-167	9,8	-72
14,13	27,4	5410	5593	-183	9,7	-83
14,38	27,4	5411	5593	-182	9,6	-78
14,63	27,4	5432	5593	-161	9,5	-53
14,88	27,4	5411	5593	-182	9,4	-69
15,13	27,5	5416	5593	-176	9,5	-59
15,38	27,5	5411	5593	-182	9,8	-58
15,63	27,5	5373	5593	-220	10,0	-86
15,88	27,5	5371	5593	-222	10,3	-78
16,13	27,5	5398	5593	-195	10,7	-41
16,38	27,6	5388	5593	-205	11,2	-47

G ₃ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	Tm	Q	Q_medio	DQ	Ta	DQ*
16,88	27,6	5378	5593	-215	12,2	-56
17,13	27,6	5356	5593	-237	12,8	-78
17,38	27,7	5407	5593	-186	13,6	-26
17,63	27,7	5401	5593	-192	14,4	-30
17,88	27,7	5341	5593	-252	15,2	-88
18,13	27,8	5460	5593	-133	15,8	34
18,38	27,8	5505	5593	-88	16,3	76
18,63	27,9	5575	5593	-18	16,7	141
18,88	27,9	5496	5593	-96	17,2	57
19,13	28,0	5511	5593	-82	17,6	66
19,38	28,0	5542	5593	-51	18,1	89
19,63	28,1	5559	5593	-34	18,5	95
19,88	28,1	5559	5593	-34	19,0	84
20,13	28,2	5549	5593	-44	19,3	63
20,38	28,2	5567	5593	-26	19,6	67
20,63	28,3	5554	5593	-39	19,8	36
20,88	28,3	5556	5593	-37	20,1	21
21,13	28,3	5607	5593	14	20,3	54
21,38	28,3	5595	5593	2	20,4	29
21,63	28,3	5558	5593	-35	20,6	-19
21,88	28,3	5532	5593	-61	20,7	-55
22,13	28,3	5496	5593	-97	21,1	-101
22,38	28,4	5526	5593	-67	21,6	-80
22,63	28,5	5548	5593	-45	22,1	-68
22,88	28,6	5618	5593	25	22,6	-9
23,13	28,6	5661	5593	68	23,0	25
23,38	28,7	5666	5593	73	23,3	22
23,63	28,7	5630	5593	37	23,6	-19
23,88	28,7	5515	5593	-78	23,9	-140
24,13	28,7	5481	5593	-112	24,1	-179
24,38	28,7	5472	5593	-121	24,2	-193
24,63	28,7	5476	5593	-117	24,4	-192
24,88	28,8	5481	5593	-112	24,5	-190
25,13	28,8	5456	5593	-136	24,6	-218
25,38	28,9	5506	5593	-87	24,5	-176
25,63	29,0	5532	5593	-60	24,5	-160
25,88	29,1	5566	5593	-27	24,4	-138
26,13	29,1	5592	5593	-1	24,5	-123
26,38	29,2	5633	5593	40	24,7	-91
26,63	29,3	5616	5593	23	24,9	-114
26,88	29,3	5776	5593	183	25,1	39
27,13	29,4	5809	5593	216	25,1	66
27,38	29,5	5792	5593	199	25,0	44
27,63	29,5	5821	5593	228	24,8	70
27,88	29,6	5853	5593	261	24,7	99
28,13	29,6	5865	5593	272	24,3	107

G ₃ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	Tm	Q	Q_medía	DQ	Ta	DQ*
28,63	29,6	5866	5593	273	23,2	108
28,88	29,6	5856	5593	263	22,7	99
29,13	29,6	5864	5593	272	22,1	109
29,38	29,7	5890	5593	297	21,6	133
29,63	29,7	5848	5593	255	21,0	86
29,88	29,7	5905	5593	312	20,5	139
30,13	29,6	5885	5593	292	20,1	114
30,38	29,6	5848	5593	255	19,9	77
30,63	29,6	5784	5593	192	19,7	17
30,88	29,6	5778	5593	185	19,5	13
31,13	29,6	5806	5593	213	19,2	45
31,38	29,5	5776	5593	183	18,9	23
31,63	29,5	5706	5593	113	18,6	-35
31,88	29,5	5744	5593	151	18,3	15
32,13	29,5	5784	5593	192	18,0	67
32,38	29,5	5869	5593	276	17,7	164
32,63	29,5	5795	5593	202	17,4	102
32,88	29,5	5700	5593	107	17,1	19
33,13	29,5	5625	5593	32	17,0	-43
33,38	29,4	5587	5593	-6	16,9	-74
33,63	29,4	5587	5593	-5	16,9	-69
33,88	29,4	5606	5593	13	16,8	-46
34,13	29,4	5587	5593	-6	16,5	-61
34,38	29,4	5606	5593	13	15,9	-36
34,63	29,4	5593	5593	1	15,3	-42
34,88	29,4	5612	5593	19	14,7	-16
35,13	29,4	5603	5593	10	14,3	-19
35,38	29,4	5651	5593	58	14,2	35
35,63	29,5	5639	5593	46	14,0	30
35,88	29,5	5597	5593	4	13,9	-5
36,13	29,5	5614	5593	21	13,7	18
36,38	29,5	5645	5593	53	13,6	54
36,63	29,5	5586	5593	-7	13,5	-5
36,88	29,5	5531	5593	-62	13,4	-59
37,13	29,5	5527	5593	-66	13,2	-62
37,38	29,4	5536	5593	-56	12,9	-45
37,63	29,5	5558	5593	-35	12,6	-10
37,88	29,5	5538	5593	-55	12,3	-17
38,13	29,5	5571	5593	-22	12,1	29
38,38	29,5	5540	5593	-53	12,0	6
38,63	29,5	5525	5593	-68	11,9	-6
38,88	29,5	5550	5593	-43	11,8	23
39,13	29,5	5590	5593	-3	11,9	67
39,38	29,5	5535	5593	-58	12,2	14
39,63	29,5	5492	5593	-101	12,4	-27
39,88	29,5	5503	5593	-90	12,7	-13

G ₃ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	Tm	Q	Q_medía	DQ	Ta	DQ*
40,38	29,5	5497	5593	-96	13,6	-13
40,63	29,5	5520	5593	-73	14,2	16
40,88	29,5	5496	5593	-97	14,7	-1
41,13	29,5	5509	5593	-84	15,4	19
41,38	29,5	5470	5593	-122	16,2	-15
41,63	29,5	5474	5593	-119	17,0	-9
41,88	29,5	5446	5593	-147	17,8	-35
42,13	29,6	5584	5593	-9	18,5	105
42,38	29,6	5608	5593	15	19,0	127
42,63	29,6	5578	5593	-15	19,5	91
42,88	29,7	5635	5593	42	20,0	143
43,13	29,7	5634	5593	41	20,6	137
43,38	29,7	5648	5593	55	21,4	142
43,63	29,8	5626	5593	33	22,2	108
43,88	29,8	5580	5593	-13	23,0	50
44,13	29,8	5613	5593	21	23,6	71
44,38	29,8	5593	5593	0	24,1	35
44,63	29,8	5644	5593	51	24,5	68
44,88	29,9	5616	5593	23	25,0	23
45,13	29,9	5655	5593	62	25,5	45
45,38	29,8	5644	5593	51	26,0	20
45,63	29,8	5579	5593	-14	26,6	-56
45,88	29,8	5529	5593	-64	27,1	-118
46,13	29,8	5543	5593	-50	27,5	-115
46,38	29,9	5559	5593	-34	27,8	-113
46,63	29,9	5598	5593	6	28,0	-91
46,88	30,0	5607	5593	14	28,3	-100

		G ₃ : Conductividad térmica del terreno sin corrección ambiental (W/(m K))																		
		Tiempo final del intervalo (h)																		
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	2,17	2,11	2,08	2,07	2,07	2,08	2,09	2,11	2,12	2,14	2,16	2,18	2,19	2,21	2,23	2,24	2,25	2,26	2,26
	6		2,05	2,02	2,01	2,01	2,02	2,04	2,06	2,08	2,10	2,12	2,14	2,16	2,18	2,20	2,22	2,23	2,23	2,24
	7			1,95	1,94	1,94	1,96	1,98	2,00	2,02	2,05	2,07	2,10	2,12	2,15	2,17	2,19	2,20	2,21	2,22
	8				1,88	1,89	1,91	1,93	1,96	1,98	2,01	2,04	2,07	2,10	2,13	2,15	2,17	2,18	2,19	2,21
	9					1,83	1,85	1,88	1,91	1,94	1,97	2,01	2,04	2,07	2,11	2,13	2,15	2,17	2,18	2,19
	10						1,78	1,81	1,85	1,88	1,92	1,96	1,99	2,03	2,07	2,10	2,12	2,14	2,15	2,17
	11							1,73	1,77	1,81	1,85	1,90	1,94	1,98	2,02	2,06	2,08	2,10	2,12	2,14
	12								1,71	1,76	1,81	1,86	1,90	1,95	2,00	2,04	2,06	2,08	2,11	2,12
	13									1,72	1,78	1,83	1,89	1,94	1,99	2,03	2,06	2,09	2,11	2,13
	14										1,76	1,82	1,88	1,94	2,00	2,05	2,08	2,11	2,13	2,15
	15											1,82	1,89	1,96	2,02	2,08	2,11	2,14	2,17	2,19
	16												1,92	1,99	2,07	2,13	2,17	2,20	2,23	2,25
	17													2,07	2,16	2,22	2,26	2,29	2,32	2,35
	18														2,29	2,37	2,41	2,44	2,47	2,49
	19															2,55	2,59	2,61	2,64	2,66
	20																2,81	2,82	2,84	2,85
	21																	3,09	3,09	3,09
	22																		3,52	3,48
	23																			4,05

		G ₃ : Conductividad térmica del terreno tras corrección (W/(m K))																		
		Tiempo final del intervalo (h)																		
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	2,14	2,13	2,12	2,13	2,13	2,14	2,15	2,16	2,16	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,16	2,16	2,17	2,18	2,20
	6		2,13	2,13	2,14	2,14	2,15	2,16	2,16	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,19	2,21
	7			2,13	2,14	2,15	2,16	2,17	2,17	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,17	2,18	2,20	2,22
	8				2,18	2,18	2,19	2,20	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,20	2,20	2,20	2,22	2,25
	9					2,21	2,22	2,23	2,23	2,24	2,24	2,24	2,23	2,23	2,23	2,22	2,22	2,22	2,24	2,27
	10						2,21	2,23	2,23	2,24	2,24	2,23	2,23	2,23	2,22	2,22	2,21	2,22	2,24	2,27
	11							2,19	2,20	2,20	2,21	2,20	2,20	2,20	2,20	2,19	2,19	2,20	2,22	2,26
	12								2,18	2,18	2,19	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,17	2,18	2,21	2,25
	13									2,19	2,19	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,17	2,18	2,21	2,26
	14										2,20	2,20	2,19	2,19	2,19	2,18	2,18	2,19	2,22	2,27
	15											2,20	2,20	2,19	2,19	2,18	2,18	2,19	2,23	2,28
	16												2,19	2,18	2,18	2,18	2,17	2,18	2,23	2,28
	17													2,18	2,18	2,17	2,16	2,18	2,23	2,29
	18														2,17	2,16	2,16	2,18	2,23	2,29
	19															2,13	2,13	2,15	2,20	2,28
	20																2,08	2,11	2,17	2,25
	21																	2,08	2,15	2,24
	22																		2,19	2,30
	23																			2,39

G ₃ : Resistencia térmica de la perforación sin corrección ambiental ((m K)/W)		Tiempo final del intervalo (h)																		
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
5	Tiempo inicial del intervalo (h)	0,0678	0,0644	0,0623	0,0614	0,0610	0,0615	0,0624	0,0632	0,0641	0,0653	0,0664	0,0675	0,0686	0,0699	0,0708	0,0714	0,0718	0,0722	0,0726
6			0,0601	0,0577	0,0570	0,0567	0,0574	0,0586	0,0597	0,0609	0,0623	0,0637	0,0651	0,0665	0,0680	0,0691	0,0698	0,0703	0,0709	0,0713
7			0,0518	0,0512	0,0512	0,0523	0,0539	0,0554	0,0569	0,0587	0,0604	0,0621	0,0638	0,0656	0,0678	0,0684	0,0691	0,0697	0,0697	0,0697
8			0,0460	0,0462	0,0478	0,0499	0,0517	0,0536	0,0558	0,0579	0,0599	0,0619	0,0641	0,0656	0,0666	0,0674	0,0682	0,0688	0,0688	0,0688
9				0,0407	0,0428	0,0454	0,0478	0,0501	0,0528	0,0552	0,0576	0,0600	0,0625	0,0643	0,0655	0,0663	0,0673	0,0680	0,0680	0,0680
10					0,0355	0,0389	0,0420	0,0449	0,0482	0,0512	0,0541	0,0569	0,0598	0,0619	0,0633	0,0644	0,0655	0,0664	0,0664	0,0664
11						0,0304	0,0343	0,0381	0,0422	0,0458	0,0493	0,0527	0,0561	0,0587	0,0604	0,0617	0,0630	0,0641	0,0641	0,0641
12							0,0278	0,0325	0,0373	0,0417	0,0459	0,0498	0,0538	0,0567	0,0587	0,0602	0,0618	0,0631	0,0631	0,0631
13								0,0284	0,0341	0,0393	0,0441	0,0486	0,0531	0,0564	0,0587	0,0604	0,0621	0,0635	0,0635	0,0635
14									0,0320	0,0379	0,0433	0,0485	0,0535	0,0572	0,0597	0,0615	0,0634	0,0649	0,0649	0,0649
15										0,0378	0,0440	0,0497	0,0553	0,0593	0,0620	0,0639	0,0659	0,0674	0,0674	0,0674
16											0,0464	0,0527	0,0588	0,0631	0,0659	0,0679	0,0698	0,0714	0,0714	0,0714
17												0,0588	0,0653	0,0697	0,0725	0,0743	0,0762	0,0776	0,0776	0,0776
18													0,0746	0,0790	0,0816	0,0832	0,0848	0,0859	0,0859	0,0859
19														0,0894	0,0916	0,0928	0,0941	0,0949	0,0949	0,0949
20															0,1021	0,1028	0,1036	0,1040	0,1040	0,1040
21																	0,1134	0,1137	0,1135	0,1135
22																		0,1276	0,1266	0,1266
23																			0,1411	0,1411

G ₃ : Resistencia térmica de la perforación tras corrección ((m K)/W)																					
		Tiempo final del intervalo (h)																			
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	0,0652	0,0642	0,0641	0,0646	0,0647	0,0652	0,0658	0,0661	0,0663	0,0666	0,0665	0,0665	0,0665	0,0665	0,0665	0,0664	0,0663	0,0666	0,0674	0,0686
	6		0,0644	0,0643	0,0648	0,0649	0,0655	0,0662	0,0665	0,0668	0,0670	0,0670	0,0669	0,0669	0,0669	0,0668	0,0667	0,0670	0,0679	0,0692	
	7			0,0647	0,0653	0,0654	0,0661	0,0669	0,0672	0,0675	0,0677	0,0676	0,0676	0,0675	0,0675	0,0673	0,0672	0,0676	0,0686	0,0700	
	8				0,0676	0,0676	0,0683	0,0691	0,0694	0,0696	0,0698	0,0696	0,0695	0,0694	0,0693	0,0690	0,0689	0,0692	0,0703	0,0719	
	9					0,0695	0,0701	0,0710	0,0712	0,0714	0,0716	0,0713	0,0711	0,0708	0,0708	0,0704	0,0701	0,0705	0,0717	0,0734	
	10						0,0698	0,0708	0,0711	0,0713	0,0715	0,0712	0,0710	0,0707	0,0706	0,0702	0,0699	0,0703	0,0717	0,0736	
	11							0,0683	0,0688	0,0691	0,0695	0,0692	0,0690	0,0688	0,0688	0,0684	0,0681	0,0687	0,0702	0,0724	
	12								0,0673	0,0678	0,0683	0,0680	0,0678	0,0677	0,0677	0,0673	0,0670	0,0677	0,0695	0,0719	
	13									0,0679	0,0684	0,0681	0,0679	0,0677	0,0677	0,0673	0,0670	0,0677	0,0697	0,0724	
	14										0,0689	0,0685	0,0683	0,0680	0,0680	0,0675	0,0672	0,0680	0,0702	0,0731	
	15											0,0689	0,0686	0,0683	0,0683	0,0677	0,0674	0,0682	0,0707	0,0739	
	16													0,0681	0,0678	0,0672	0,0668	0,0678	0,0705	0,0741	
	17														0,0674	0,0667	0,0664	0,0675	0,0705	0,0745	
18															0,0670	0,0663	0,0659	0,0672	0,0705	0,0750	
19																0,0637	0,0635	0,0650	0,0689	0,0739	
20																	0,0599	0,0618	0,0663	0,0720	
21																		0,0595	0,0647	0,0712	
22																			0,0682	0,0751	
23																				0,0815	

G ₃ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste sin corrección ambiental (-)																				
		Tiempo final del intervalo (h)																		
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
	6		0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	7			0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95
	8				0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
	9					0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
	10						0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,93
	11							0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92
	12								0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91
	13									0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90
	14										0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,87	0,88	0,88	0,88
	15											0,88	0,87	0,86	0,85	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87
	16												0,85	0,84	0,83	0,83	0,83	0,84	0,84	0,85
	17													0,81	0,80	0,80	0,80	0,81	0,82	0,82
	18														0,76	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80
	19															0,72	0,73	0,75	0,76	0,77
20																0,69	0,70	0,72	0,73	
21																	0,65	0,67	0,69	
22																		0,62	0,65	
23																			0,60	

		G ₃ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste tras corrección (-)																		
		Tiempo final del intervalo (h)																		
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	6		0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	7			0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	8				0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	9					0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
	10						0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98
	11							0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	12								0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	13									0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97
	14										0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97
	15											0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96
	16												0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96
	17													0,95	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,95
	18														0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95
	19															0,95	0,96	0,96	0,95	0,94
20																	0,95	0,95	0,95	0,93
21																		0,95	0,94	0,92
22																			0,93	0,91
23																				0,90

Test de respuesta térmica realizado sobre el relleno G₄

G₄: Potencia térmica inyectada durante el ensayo

t(h)	Tm	Q	Q_medía	DQ	Ta	DQ*
5,13	26,6	6014	5693	322	31,8	180
5,38	26,6	5922	5693	229	31,4	81
5,63	26,7	5893	5693	200	31,1	50
5,88	26,8	5935	5693	242	30,7	89
6,13	26,8	5907	5693	214	30,2	58
6,38	26,9	5873	5693	180	29,7	22
6,63	27,0	5892	5693	200	29,2	41
6,88	27,1	5862	5693	169	28,7	9
7,13	27,1	5866	5693	174	28,2	13
7,38	27,2	5862	5693	169	27,8	8
7,63	27,2	5855	5693	162	27,4	2
7,88	27,3	5916	5693	224	27,0	64
8,13	27,4	5980	5693	287	26,4	128
8,38	27,5	5996	5693	304	25,5	146
8,63	27,6	6016	5693	324	24,7	170
8,88	27,6	5977	5693	285	23,8	136
9,13	27,7	5990	5693	297	23,2	154
9,38	27,7	5934	5693	241	22,9	102
9,63	27,7	5867	5693	175	22,6	43
9,88	27,7	5791	5693	98	22,3	-27
10,13	27,7	5755	5693	63	22,1	-55
10,38	27,7	5737	5693	45	22,0	-67
10,63	27,8	5763	5693	70	21,8	-36
10,88	27,8	5757	5693	65	21,7	-36
11,13	27,8	5792	5693	100	21,4	4
11,38	27,9	5808	5693	116	21,1	26
11,63	27,9	5809	5693	117	20,8	37
11,88	27,9	5724	5693	31	20,5	-37
12,13	28,0	5773	5693	80	20,3	23
12,38	28,0	5782	5693	89	20,2	42
12,63	28,0	5750	5693	57	20,0	14
12,88	28,1	5696	5693	3	19,9	-36
13,13	28,1	5758	5693	66	19,6	31
13,38	28,1	5723	5693	30	19,3	-1
13,63	28,2	5729	5693	37	18,9	8
13,88	28,2	5769	5693	76	18,6	49
14,13	28,3	5764	5693	72	18,4	47
14,38	28,3	5736	5693	44	18,3	21
14,63	28,3	5756	5693	64	18,3	44
14,88	28,4	5758	5693	65	18,2	50
15,13	28,4	5775	5693	83	18,1	71
15,38	28,4	5787	5693	94	18,0	87
15,63	28,5	5737	5693	44	17,8	39
15,88	28,4	5635	5693	-57	17,7	-61
16,13	28,4	5649	5693	-44	17,5	-45
16,38	28,5	5625	5693	-68	17,4	-67

G₄: Potencia térmica inyectada durante el ensayo

t(h)	Tm	Q	Q_medía	DQ	Ta	DQ*
16,88	28,5	5636	5693	-57	17,1	-47
17,13	28,5	5610	5693	-83	17,0	-69
17,38	28,5	5585	5693	-107	17,0	-89
17,63	28,5	5567	5693	-126	17,0	-107
17,88	28,5	5541	5693	-152	17,0	-132
18,13	28,5	5498	5693	-194	17,3	-174
18,38	28,6	5552	5693	-140	17,8	-119
18,63	28,6	5613	5693	-80	18,4	-57
18,88	28,6	5516	5693	-176	18,9	-152
19,13	28,6	5449	5693	-244	19,3	-217
19,38	28,6	5580	5693	-112	19,6	-84
19,63	28,7	5632	5693	-60	19,8	-30
19,88	28,7	5615	5693	-77	20,1	-44
20,13	28,7	5585	5693	-108	20,6	-73
20,38	28,7	5549	5693	-144	21,4	-107
20,63	28,7	5536	5693	-156	22,2	-120
20,88	28,8	5604	5693	-88	23,0	-52
21,13	28,8	5593	5693	-100	23,6	-63
21,38	28,8	5625	5693	-67	24,0	-32
21,63	28,9	5606	5693	-87	24,4	-57
21,88	28,9	5610	5693	-82	24,8	-60
22,13	28,9	5577	5693	-116	25,0	-101
22,38	28,9	5609	5693	-84	25,1	-75
22,63	29,0	5630	5693	-63	25,1	-58
22,88	29,0	5657	5693	-36	25,2	-34
23,13	29,0	5657	5693	-35	25,4	-37
23,38	28,8	5705	5693	12	25,8	6
23,63	28,9	5757	5693	65	26,2	49
23,88	29,0	5729	5693	36	26,6	10
24,13	29,1	5727	5693	35	26,1	-2
24,38	29,2	5743	5693	50	24,7	4
24,63	29,2	5738	5693	46	23,3	-6
24,88	29,3	5733	5693	41	21,9	-16
25,13	29,3	5791	5693	98	20,9	36
25,38	29,4	5834	5693	142	20,4	75
25,63	29,5	5798	5693	106	19,9	38
25,88	29,5	5811	5693	119	19,4	50
26,13	29,5	5766	5693	73	19,2	4
26,38	29,5	5678	5693	-15	19,2	-85
26,63	29,5	5709	5693	16	19,2	-59
26,88	29,4	5714	5693	21	19,2	-59
27,13	29,5	5667	5693	-26	19,3	-112
27,38	29,5	5676	5693	-16	19,4	-104
27,63	29,5	5655	5693	-38	19,5	-110
27,88	29,5	5610	5693	-83	19,6	-137
28,13	29,5	5619	5693	-74	19,6	-110

G ₄ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	T _m	Q	Q_media	DQ	T _a	DQ*
28,38	29,5	5636	5693	-57	19,7	-76
28,63	29,5	5645	5693	-47	19,7	-59
28,88	29,5	5602	5693	-91	19,8	-96
29,13	29,5	5615	5693	-77	19,7	-76
29,38	29,5	5594	5693	-99	19,4	-92
29,63	29,5	5626	5693	-67	19,2	-59
29,88	29,6	5599	5693	-94	18,9	-86
30,13	29,6	5601	5693	-92	18,6	-84
30,38	29,6	5648	5693	-45	18,3	-37
30,63	29,6	5596	5693	-96	18,0	-90
30,88	29,7	5591	5693	-102	17,7	-96
31,13	29,7	5699	5693	6	17,4	10
31,38	29,8	5674	5693	-18	16,9	-15
31,63	29,8	5696	5693	3	16,5	5
31,88	29,8	5742	5693	50	16,0	51
32,13	29,8	5682	5693	-10	15,7	-9
32,38	29,8	5688	5693	-4	15,6	-4
32,63	29,9	5661	5693	-31	15,4	-28
32,88	29,9	5702	5693	9	15,3	16
33,13	29,9	5711	5693	18	15,0	28
33,38	29,9	5648	5693	-44	14,7	-31
33,63	29,9	5555	5693	-137	14,3	-120
33,88	29,9	5633	5693	-60	14,0	-39
34,13	29,9	5631	5693	-61	13,7	-37
34,38	29,9	5673	5693	-20	13,6	9
34,63	30,0	5697	5693	5	13,4	39
34,88	30,0	5736	5693	44	13,3	84
35,13	30,0	5732	5693	40	13,1	86
35,38	30,0	5753	5693	61	13,0	113
35,63	30,0	5701	5693	8	12,9	63
35,88	30,1	5669	5693	-24	12,8	32
36,13	30,0	5669	5693	-24	12,7	34
36,38	30,0	5645	5693	-47	12,4	13
36,63	30,0	5597	5693	-95	12,2	-31
36,88	30,0	5597	5693	-96	11,9	-26
37,13	30,0	5604	5693	-89	11,8	-15
37,38	30,0	5629	5693	-64	11,7	14
37,63	30,1	5657	5693	-35	11,7	45
37,88	30,1	5640	5693	-53	11,6	29
38,13	30,1	5642	5693	-51	11,6	33
38,38	30,1	5671	5693	-21	11,5	64
38,63	30,1	5640	5693	-53	11,5	35
38,88	30,1	5680	5693	-13	11,4	76
39,13	30,2	5680	5693	-13	11,3	77
39,38	30,2	5730	5693	37	11,2	129
39,63	30,2	5712	5693	20	11,1	114

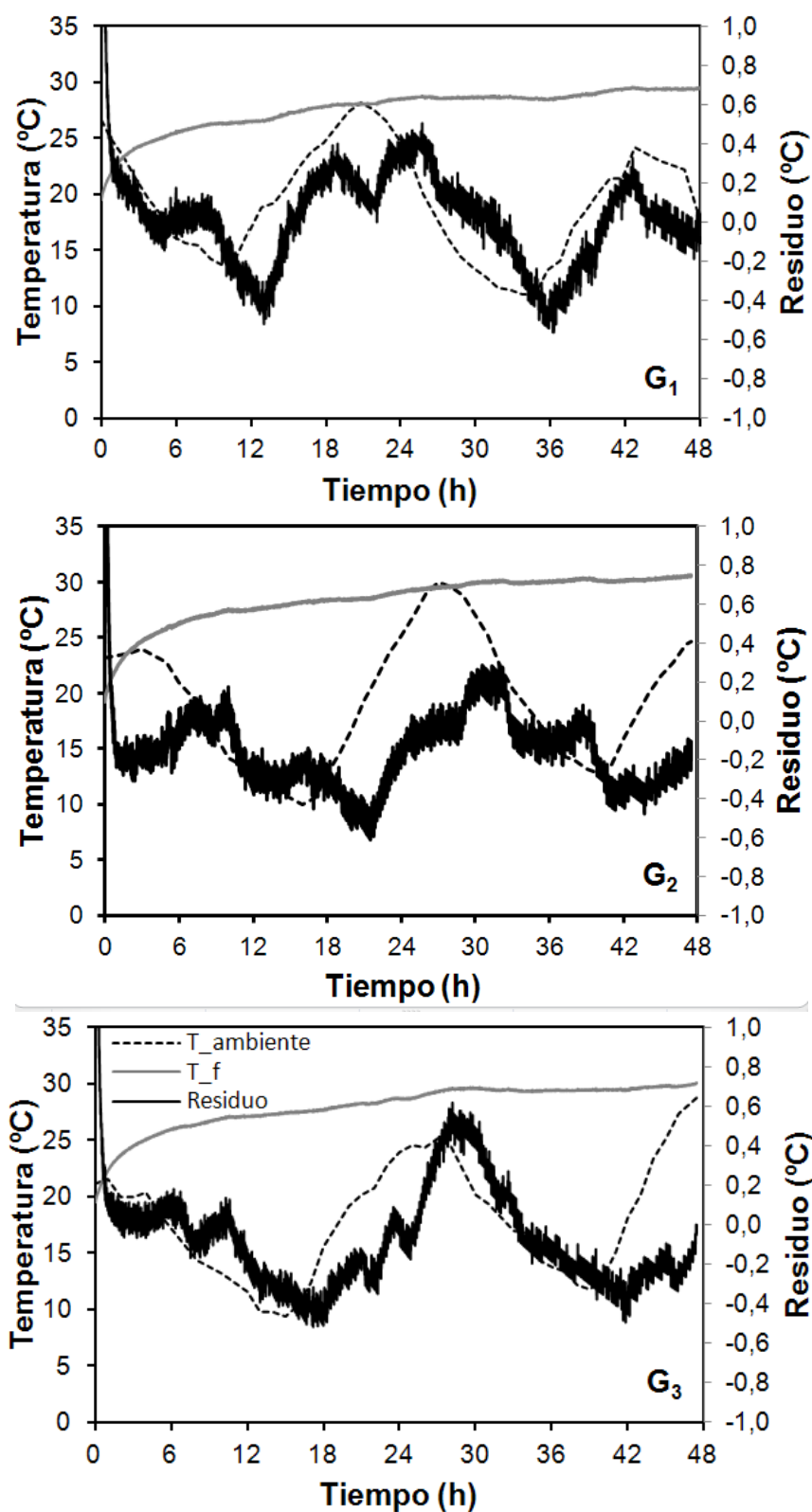
G ₄ : Potencia térmica inyectada durante el ensayo						
t(h)	T _m	Q	Q_media	DQ	T _a	DQ*
39,88	30,2	5702	5693	10	11,0	108
40,13	30,2	5718	5693	25	10,9	126
40,38	30,3	5694	5693	1	10,7	105
40,63	30,3	5726	5693	33	10,5	138
40,88	30,3	5744	5693	52	10,3	157
41,13	30,3	5710	5693	18	10,3	124
41,38	30,3	5702	5693	10	10,6	117
41,63	30,3	5740	5693	47	10,8	154
41,88	30,4	5759	5693	67	11,1	175
42,13	30,4	5732	5693	40	11,6	149
42,38	30,4	5734	5693	42	12,5	151
42,63	30,4	5641	5693	-51	13,3	59
42,88	30,4	5602	5693	-91	14,2	21
43,13	30,3	5600	5693	-92	14,9	21
43,38	30,3	5583	5693	-109	15,5	5
43,63	30,3	5599	5693	-93	16,1	24
43,88	30,3	5576	5693	-117	16,7	3
44,13	30,3	5606	5693	-86	17,2	36
44,38	30,3	5537	5693	-155	17,5	-31
44,63	30,3	5566	5693	-126	17,9	-5
44,88	30,3	5538	5693	-155	18,2	-36
45,13	30,3	5503	5693	-190	18,7	-74
45,38	30,2	5459	5693	-233	19,2	-122
45,63	30,2	5530	5693	-162	19,7	-62
45,88	30,2	5543	5693	-149	20,2	-60
46,13	30,3	5535	5693	-157	20,5	-79
46,38	30,3	5558	5693	-135	20,6	-67
46,63	30,4	5608	5693	-84	20,8	-25
46,88	30,4	5651	5693	-41	20,9	11
47,13	30,4	5629	5693	-64	21,1	-20
47,38	30,4	5653	5693	-39	21,4	-3
47,63	30,5	5654	5693	-38	21,6	-6
47,88	30,5	5702	5693	9	21,9	37

		G ₄ : Conductividad térmica del terreno sin corrección ambiental (W/(m K))																			
		Tiempo final del intervalo (h)																			
Tiempo inicial del intervalo (h)		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	5	2,81	2,80	2,78	2,75	2,72	2,70	2,68	2,65	2,64	2,63	2,62	2,61	2,60	2,59	2,57	2,57	2,57	2,58	2,58	2,58
	6		2,79	2,77	2,74	2,71	2,68	2,65	2,63	2,62	2,61	2,60	2,59	2,57	2,56	2,55	2,54	2,55	2,56	2,56	2,56
	7			2,77	2,74	2,70	2,67	2,64	2,62	2,60	2,59	2,58	2,57	2,56	2,54	2,53	2,53	2,53	2,54	2,55	2,54
	8				2,72	2,68	2,64	2,61	2,59	2,57	2,56	2,55	2,54	2,53	2,51	2,50	2,50	2,50	2,51	2,52	2,52
	9					2,61	2,58	2,55	2,52	2,51	2,50	2,49	2,48	2,47	2,46	2,44	2,44	2,45	2,47	2,48	2,48
	10						2,51	2,48	2,46	2,45	2,44	2,44	2,43	2,41	2,40	2,39	2,39	2,40	2,42	2,43	2,44
	11							2,44	2,41	2,40	2,40	2,40	2,39	2,38	2,37	2,36	2,36	2,37	2,39	2,41	2,41
	12								2,37	2,36	2,36	2,36	2,35	2,34	2,33	2,32	2,33	2,34	2,37	2,38	2,39
	13									2,32	2,32	2,32	2,31	2,31	2,30	2,29	2,30	2,31	2,34	2,36	2,36
	14										2,27	2,27	2,27	2,26	2,26	2,25	2,26	2,28	2,31	2,33	2,34
	15											2,22	2,22	2,21	2,21	2,20	2,21	2,23	2,27	2,30	2,31
	16												2,15	2,15	2,15	2,14	2,16	2,19	2,23	2,25	2,27
	17													2,10	2,10	2,10	2,12	2,15	2,20	2,23	2,24
	18														2,07	2,08	2,10	2,13	2,18	2,22	2,23
	19															2,07	2,10	2,14	2,19	2,23	2,25
	20																	2,11	2,15	2,22	2,26
	21																		2,18	2,25	2,29
	22																			2,29	2,33
	23																				2,38
	24																				2,54

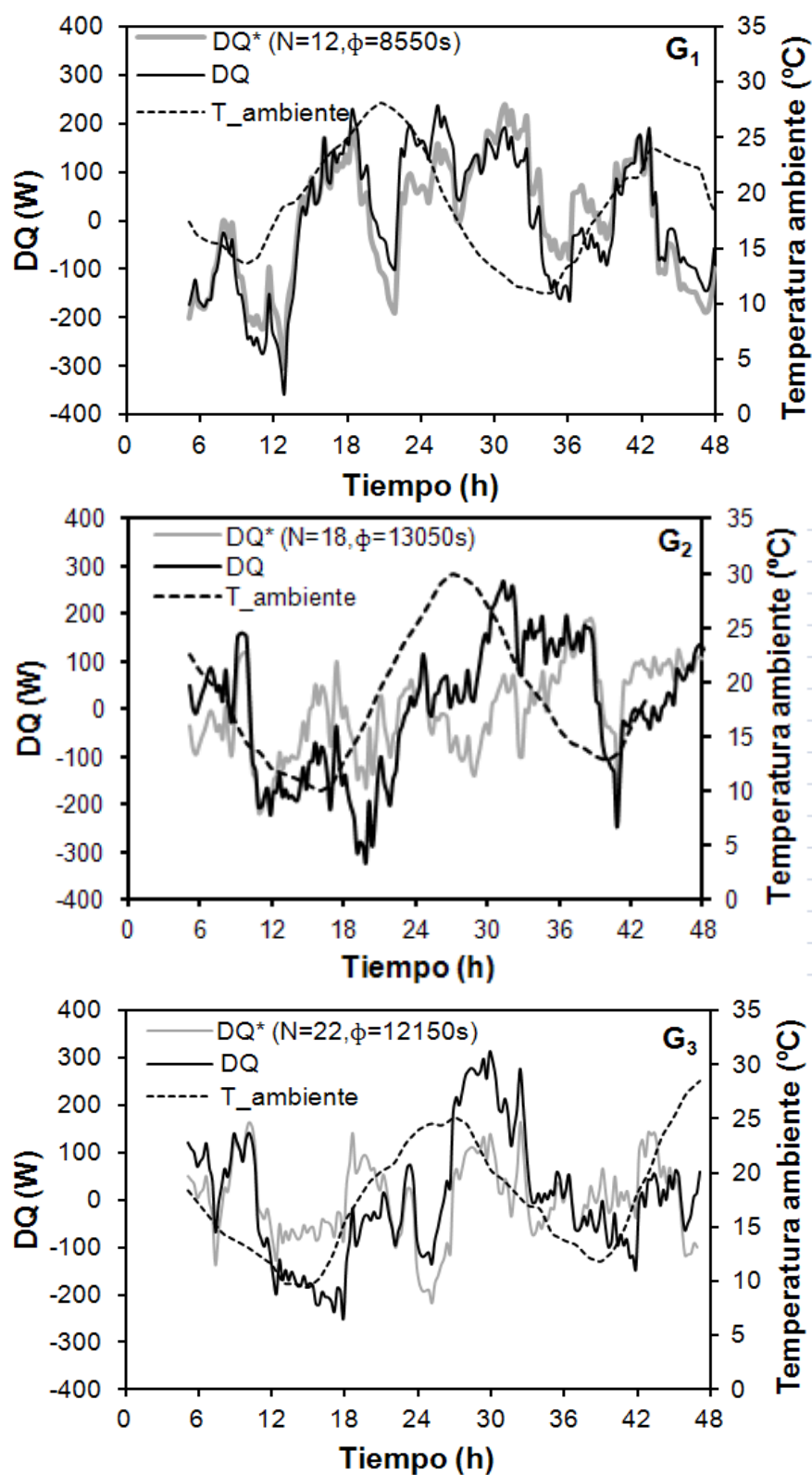
G ₄ : Coeficiente de correlación R ² del ajuste sin corrección ambiental (-)																					
		Tiempo final del intervalo (h)																			
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	6		0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99
	7			0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	8				0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	9					0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	10						0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	11							0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	12								0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	13									0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	14										0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97
	15											0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97
	16												0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97
	17													0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97
	18														0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97
	19															0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96
	20																	0,97	0,97	0,96	0,95
21																		0,96	0,95	0,95	0,95
22																			0,94	0,94	0,94
23																				0,93	0,94
24																					0,94

G ₄ : Resistencia térmica de la perforación sin corrección ambiental ((m K)/W)																							
		Tiempo final del intervalo (h)																					
		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48		
Tiempo inicial del intervalo (h)	5	0,1071	0,1068	0,1064	0,1055	0,1044	0,1036	0,1029	0,1020	0,1016	0,1014	0,1010	0,1006	0,1001	0,0995	0,0990	0,0990	0,0990	0,0991	0,0997	0,0999	0,0999	
	6		0,1068	0,1064	0,1052	0,1040	0,1031	0,1022	0,1013	0,1008	0,1005	0,1002	0,0997	0,0991	0,0985	0,0980	0,0980	0,0979	0,0981	0,0988	0,0990	0,0990	
	7			0,1068	0,1054	0,1040	0,1029	0,1019	0,1008	0,1003	0,1000	0,0996	0,0990	0,0984	0,0977	0,0971	0,0971	0,0971	0,0973	0,0981	0,0984	0,0984	
	8				0,1049	0,1032	0,1020	0,1008	0,0997	0,0991	0,0988	0,0984	0,0978	0,0971	0,0964	0,0958	0,0958	0,0958	0,0961	0,0969	0,0974	0,0974	
	9					0,1006	0,0993	0,0981	0,0968	0,0963	0,0961	0,0957	0,0951	0,0945	0,0938	0,0932	0,0932	0,0937	0,0947	0,0952	0,0953		
	10						0,0961	0,0949	0,0937	0,0932	0,0930	0,0928	0,0922	0,0916	0,0909	0,0903	0,0903	0,0905	0,0911	0,0924	0,0930	0,0931	
	11							0,0927	0,0914	0,0910	0,0909	0,0907	0,0902	0,0896	0,0889	0,0883	0,0886	0,0893	0,0907	0,0915	0,0917		
	12								0,0890	0,0887	0,0887	0,0886	0,0881	0,0875	0,0869	0,0863	0,0863	0,0867	0,0875	0,0892	0,0901	0,0904	
	13									0,0862	0,0863	0,0863	0,0859	0,0854	0,0847	0,0842	0,0847	0,0857	0,0876	0,0887	0,0891		
	14										0,0834	0,0835	0,0832	0,0827	0,0822	0,0817	0,0824	0,0836	0,0858	0,0871	0,0875		
	15											0,0797	0,0796	0,0793	0,0788	0,0784	0,0784	0,0794	0,0809	0,0834	0,0849	0,0855	
	16												0,0750	0,0749	0,0746	0,0744	0,0744	0,0756	0,0775	0,0805	0,0823	0,0831	
	17													0,0714	0,0713	0,0712	0,0712	0,0728	0,0750	0,0784	0,0805	0,0814	
	18														0,0688	0,0688	0,0688	0,0707	0,0733	0,0772	0,0795	0,0806	
	19															0,0683	0,0683	0,0705	0,0733	0,0777	0,0802	0,0814	
	20																0,0713	0,0744	0,0792	0,0820	0,0832		
	21																	0,0762	0,0814	0,0844	0,0856		
	22																		0,0840	0,0871	0,0883		
	23																			0,0903	0,0914		
	24																				0,0996		

Influencia de la temperatura ambiente en la evolución de la curva de temperatura media del fluido obtenida para cada uno de los TRTs realizados



Influencia de la temperatura ambiente en la potencia térmica inyectada



Gráficas de probabilidad-probabilidad lognormal de la conductividad térmica del terreno y la resistencia térmica de la perforación

