

Optimización económica en una instalación geotérmica: “Material de relleno”

JUAN A. DE ISABEL (*)

RESUMEN En las aplicaciones geotérmicas de muy baja entalpía, el relleno del espacio anular de los sondeos geotérmicos es considerado cada vez más como un elemento clave en estas instalaciones. La utilización de una suspensión de alta conductividad térmica permite una disminución en el número de metros lineales de intercambio, reduciendo el tiempo de amortización de la instalación. Su aplicación en viviendas unifamiliares redonda directamente en el usuario, con una reducción en el consumo debido al incremento del rendimiento estacional de la instalación; en grandes proyectos es una de las variables claves para la optimización económica del proyecto completo, al disminuir el número de metros de geointercambio.

ECONOMICAL OPTIMIZATION IN GEOTHERMAL PROJECTS: “FILLING MATERIAL”

ABSTRACT In shallow geothermal energy applications, the filling material through the borehole is considered as a main feature in every geothermal project. The use of an adequate filling material decreases the necessary number of linear meters for a correct geothermal exchange, dropping the pay back period of the installation as well. The use of this kind of material in the field of single-family houses means a direct benefit to the owner, as the installation will increase its seasonal performance factor, dropping the electrical consumption. Likewise in big geothermal projects the optimization of the installation can only be achieved with the use of a proper geothermal filling material.

Palabras clave: Geotermia de muy baja entalpía, Sondeos geotérmicos, Material de relleno, Conductividad térmica, Rendimiento estacional.

Keywords: Shallow geothermal energy, Geothermal boreholes, Filling material, Thermal conductivity, Seasonal performance factor (SPF).

1. CONSIDERACIONES GENERALES

En todo proyecto geotérmico se deben aunar diferentes técnicas y principios. El éxito del mismo consistirá en que todos los factores hayan sido considerados con los máximos niveles de calidad exigibles. Un proyecto geotérmico se puede dividir en tres grandes bloques: estudio de climatización de la demanda energética del edificio, procedimiento de realización del sondeo o pozo vertical y análisis de la oferta energética que el subsuelo nos brinda.

Dentro de cada uno de ellos la tecnología disponible nos permite alcanzar el actual estado del arte. Los estudios de Arquitectura llevan años disminuyendo la demanda energética de la edificación, no solo debido a la necesidad impuesta por la normativa vigente a través del CTE, sino mediante la utilización de materiales y sistemas que emplean tanto la inercia térmica del edificio, como elementos bioclimáticos, redundando positivamente en la consecución de inferiores valores de consumo específico por cada metro cuadrado.

Los profesionales de la perforación y cimentación están modificando su parque de maquinaria con equipos especialmente

adaptados a la geotermia de baja entalpía: equipos provistos de doble cabeza de rotación, tres mordazas, utilización de “pre-venter”, equipamiento anexo para alcanzar las profundidades establecidas en el diseño del proyecto así como para garantizar una adecuada protección medioambiental.

El análisis del terreno y la obtención de la oferta energética del mismo se debe realizar con rigor y precisión. El dimensionamiento de los pozos repercute en el futuro en el consumo de la instalación y en el posible agotamiento del terreno. A partir de una potencia de 30 kW y de acuerdo con la Norma VDI 4640, la realización de un ensayo de respuesta térmica in situ permitirá la optimización de la instalación, gracias al conocimiento más detallado de la oferta energética que el subsuelo proporciona.

Por debajo de esa potencia resulta una labor ardua la realización del diseño de intercambiadores para viviendas o instalaciones, al no existir tablas ni ábacos disponibles en los países europeos de nuestro entorno, ya que en la mayoría de los casos todas estas instalaciones se llevan a cabo para trabajar con dos modos de funcionamiento: calefacción y refrigeración. Como es sabido, los países más avanzados en el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía la han empleado históricamente para proporcionar calefacción, de manera que si todo proyecto geotérmico es un prototipo en sí

(*) Director Gerente – GEOTER / GEOTHERMAL ENERGY S.L.



FIGURA 1. Equipo de perforación geotérmica equipado con "preventer"
(Fuente: Klemm Bohrtechnik).



FIGURA 2. Realización de TRT en el centro de Madrid por técnicos de Geoter.
(Fuente: Geoter).

mismo, los proyectos realizados en España necesitan con más motivo un estudio y una simulación previa.

Son múltiples los factores clave para garantizar estos tipos de instalación energética en España, pero la tecnología y técnicas referentes a la perforación, introducción de sondas, tipo y calidad de las mismas, e inyección con material de relleno son los que deben ser considerados con mayor atención, debido al hecho de permanecer inaccesible durante toda la vida útil de la instalación, una vez ha sido ejecutada.

Esta partida representa un gran porcentaje del coste del proyecto total y la optimización económica de la misma debe realizarse considerando la instalación de manera completa, y con el objetivo de reducir el plazo de amortización de la misma, en lugar de intentar "abaratar" dicha partida acarreado una disminución grave en los niveles de calidad necesarios que dicha instalación necesita para su funcionamiento a largo plazo y para la sostenibilidad por lo que respecta al terreno.



FIGURA 3. Equipo de perforación geotérmico (Fuente: Geoter).

La perforación se debe realizar con la profundidad determinada por el dimensionamiento energético, se deben utilizar conductos de polietileno de alta densidad con la calidad marcada por Normativa VDI ó SIA, y hay que emplear un material de relleno adecuado a la hidrogeología existente.

El objeto de este artículo es presentar la importancia que el “material de relleno” tiene en todo sondeo tanto para usuarios finales, proyectistas, coordinadores de planificación y autoridades dedicados al tema de los sondeos geotérmicos.

2. EL MATERIAL DE RELLENO

En general, en el mercado se habla de distintas posibilidades, por ejemplo, lechada de cemento, suspensión de cemento-bentonita o sellado conductivo. Sin embargo, la denominación técnica de los productos acabados y aptos para ser utilizados como relleno es: “**material de relleno o sellado**”. Los distintos fabricantes existentes combinan las materias primas contenidas en el material de relleno adecuadamente para garantizar las propiedades específicas del producto. Gran parte de dichos productos son sistemas de multicomponentes muy complejos.

El abanico de proveedores es naturalmente muy amplio, siendo este aspecto positivo. Sin embargo, los diferentes productos se diferencian –en parte muy claramente– por sus propiedades, como por ejemplo por: su contenido en sólidos, resistencia a la presión, permeabilidad al agua, propiedades de flujo y conductividad térmica; lo que determina también en gran medida la diferencia de precios. Esta diferencia en los precios equivaldrá consecuentemente a un incremento del rendimiento estacional de la instalación (SPF), produciéndose una disminución de la factura energética futura.

Aunque el sobrecoste inicial en la perforación correspondiente a la utilización de material de relleno de buena calidad repercute en unos determinados plazos de amortización, estos son cortos y se garantiza el funcionamiento de la instalación. En las grandes instalaciones permite disminuir el número de metros lineales de intercambio energético necesario, de manera que se compensa rápidamente dicho incremento económico. Según define la directriz VDI 4640 [1], todos estos productos deben cumplir las siguientes funciones:

- Garantizar la transmisividad del calor desde el subsuelo hasta la sonda geotérmica.
- Permitir el restablecimiento de los estratos que separan distintas capas freáticas.
- Evitar la entrada de posibles fugas de fluido caloportador.

3. PREPARACIÓN DEL MATERIAL DE RELLENO

Para conseguir un relleno homogéneamente cohesionado, el material de relleno –en particular, respecto de la técnica o el sistema de inyección– debe ser una suspensión fácilmente bombeable y con un volumen definido. En este contexto, las siguientes propiedades o características del material son muy importantes:

- Razón entre agua y sólidos (coeficiente W/F).
- Densidad de la suspensión.
- Desprendimiento de agua.
- Reología de la mezcla.

El factor más importante a la hora de mezclar el material de relleno es el cumplimiento del coeficiente entre agua y sólidos (coeficiente W/F) especificado por el fabricante. Este coeficiente representa el cociente de masa determinado por la cantidad de agua y de material de construcción necesario. Las



FIGURA 4. Pallets de ThermoCem utilizados en Colmenar Viejo. (Fuente: Geoter).



FIGURA 5. Equipo de perforación específico para geotermia. (Fuente: Geoter).

características técnicas especificadas por el fabricante sólo se pueden alcanzar si se cumple dicho coeficiente W/F, por lo que es imprescindible solicitar al fabricante las fichas técnicas del material de relleno antes de utilizarlo. La mayoría de los fabricantes de material de relleno indican, en la parte trasera de los sacos, la proporción de mezcla adecuada, lo que facilita el cumplimiento del coeficiente W/F, para poder así controlarlo.

Si no se cumple el coeficiente W/F especificado por el fabricante y se emplea una mayor cantidad de agua en la mezcla con la suspensión de material de relleno, se produce un alto desprendimiento de agua. Es cierto que esa suspensión es menos viscosa y, por consiguiente, sería más fácil bombearla, pero debido al mayor desprendimiento de agua se produciría una caída más pronunciada de la columna de relleno del sondeo, lo que implicaría realizar de nuevo el relleno.

Un contenido excesivo de agua puede reducir la resistencia o incluso impedir del todo el endurecimiento. Y por último, una mayor cantidad de agua reduce asimismo la proporción de sólidos, reduciéndose por consiguiente la conductividad térmica.

Para obtener una suspensión estable del material de relleno no sólo es importante el coeficiente W/F sino también la duración e intensidad de la mezcla, que deben ser las adecuadas.

Las propiedades reológicas (p. ej. la viscosidad) de una suspensión son determinantes para su capacidad de bombeo y su índice de fluidez. Una buena bombeabilidad es condición previa para realizar un relleno sin problemas. Hay que tener en cuenta que se emplea el "procedimiento de hormigonado bajo agua", es decir, desde la cota más profunda de la perforación; las perforaciones se rellenan a través de la tubería de inyección acoplada (p. ej. 32 mm) o varillas de inyección (p. ej. 1").

En este contexto, la composición básica del material de relleno debe cumplir ciertos requisitos fundamentales. Cuanto más viscoso ("rígido") sea el material de relleno, más elevadas serán las presiones de bombeo. Hay que tener en cuenta que la presión hidrostática relacionada con un sondeo de 100 m (densidad de la suspensión 1,50 t/m³) ya asciende a 15 bares en el

punto más bajo de la perforación. Al mismo tiempo, la suspensión debe garantizar un relleno sin huecos, es decir, la suspensión debe llenar todos los huecos del sistema a pesar de la resistencia ofrecida por los "obstáculos a la fluidez" como por ejemplo los propios tubos de polietileno, distanciadores y centradores, a lo largo de toda la longitud del sondeo. A pesar de una buena fluidez, deben evitarse pérdidas extremas de suspensión en zonas de terreno muy fisuradas. Y finalmente, la suspensión de relleno debe ser capaz de expulsar cualquier lodo procedente de la perforación que se encuentre en el interior.

En el mercado existe una inmensa oferta en cuanto a tecnología de mezcla/inyección. Pero, ¿qué sistema se debe elegir?

Hay una gran cantidad de material de relleno disponible con propiedades diversas, pero también existen grandes diferencias en cuanto al procedimiento mecánico.

Básicamente se distinguen dos tipos de mezcla:

- Preparación coloidal (mezclador por intervalos de cargas).
- Preparación a baja velocidad (mezclador por intervalos de cargas, mezclador continuo).

3.1. PREPARACIÓN COLOIDAL

Para mezclas coloidales, las suspensiones se mezclan por intervalos de cargas, alternándose elevados esfuerzos cortantes, fuerzas centrífugas y turbulencias (en función de la duración del proceso de mezcla del material de construcción). Las suspensiones dispersadas de este modo alcanzan una disgregación óptima. Las suspensiones con elevado contenido de bentonita necesitan la disgregación coloidal para desarrollar el proceso de hinchamiento totalmente ya en el mezclador, de modo que no se produzca un hinchamiento posterior y el usuario pueda disponer, durante el tiempo de elaboración, de suspensiones con propiedades constantes.

3.2. PREPARACIÓN A BAJA VELOCIDAD

Hay diferentes tipos de mezcladores para la preparación a baja velocidad. Aparte del mezclador de circulación forzada (mezclador por cargas) se dispone también del mezclador horizontal de tubo (mezclador continuo) y del mezclador probablemente más utilizado en la actualidad: la bomba mezcladora (mezclador continuo). Las bombas mezcladoras son unidades especiales procedentes de los trabajos relacionados con revocos y morteros y muy idóneas para preparar material de relleno con mezcla de granulación.

Todos esos mezcladores deben considerarse en relación con las bombas disponibles. Son habituales bombas de husillo helicoidal excéntrico, bombas de émbolo y bombas centrífugas. Todos los componentes de la instalación (mezclador, bomba, opcionalmente mecanismo mezclador) se deben combinar adecuadamente. También se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Presión de trabajo.
- Desgaste.
- Caudal a transportar.
- Medio a transportar.
- Limpieza, mantenimiento.

Condición previa básica para un relleno adecuado es una buena fluidez y una elevada estabilidad de sedimentación de la suspensión empleada. La fluidez de una suspensión disminuye al aumentar el contenido de sólidos, por lo que el empleo de material de relleno con una cantidad extrema de sólidos, pero careciendo de potenciadores de fluidez, va unido al riesgo de rellenar de un modo incompleto el espacio anular. Las suspensiones con potenciadores de fluidez y ricas en sólidos tienen la fluidez necesaria sólo si el tipo y el tiempo de preparación son los adecuados.

Debido a las interacciones de atracción entre las partículas de arcilla, en la suspensión en reposo se forman estructuras



FIGURA 6. Máquina Mezcladora utilizada en trabajos con ThermoCem. (Fuente: Geoter-Edasu).

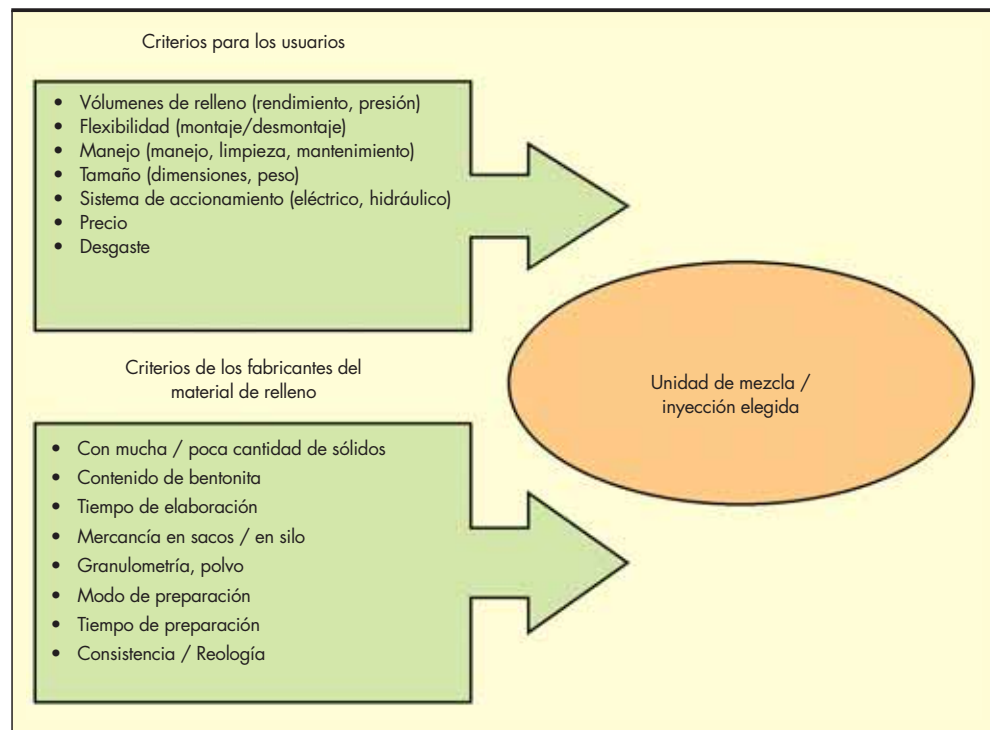


FIGURA 7. Reología de la suspensión del material de construcción.

en las que se incrustan las partículas de aglutinante, manteniéndose así en suspensión. En este contexto es importante que la proporción de mineral arcilloso contenida en la composición del material sea adecuada en función de la influencia del componente de aglutinante. Los aglutinantes en base a cemento liberan grandes cantidades de iones de calcio inmediatamente después de la mezcla con agua. Si el componente arcilloso del material de relleno contiene minerales arcillosos expansivos, por ejemplo bentonita sódica, los iones de calcio se almacenan en los intersticios entre las capas de cristales arcillosos, por lo que la expansividad o hinchabilidad de las arcillas se reduce claramente. Para minimizar este efecto, se

debería prestar una atención especial a la hora de seleccionar los diferentes componentes (por ejemplo, empleo de bentonitas estables al cemento y cementos CEM III B en lugar de cementos CEM I).

4. PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MATERIAL DE RELLENO

4.1. RESISTENCIA MECÁNICA

El componente de aglutinante contenido en el material de relleno produce, transcurrido el tiempo de elaboración, una soli-

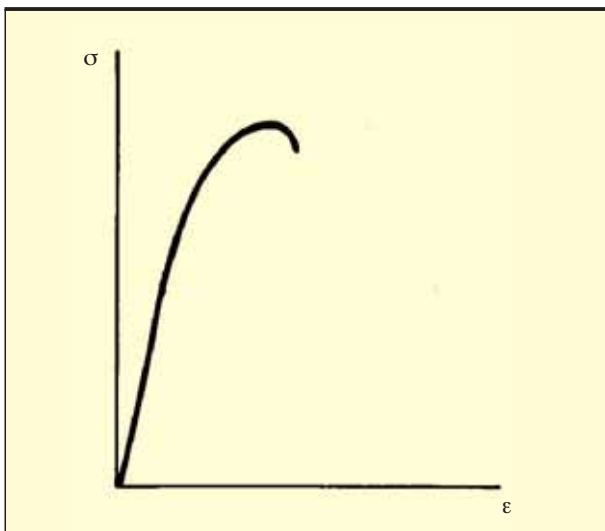


FIGURA 8. Comportamiento frágil tensión- deformación.

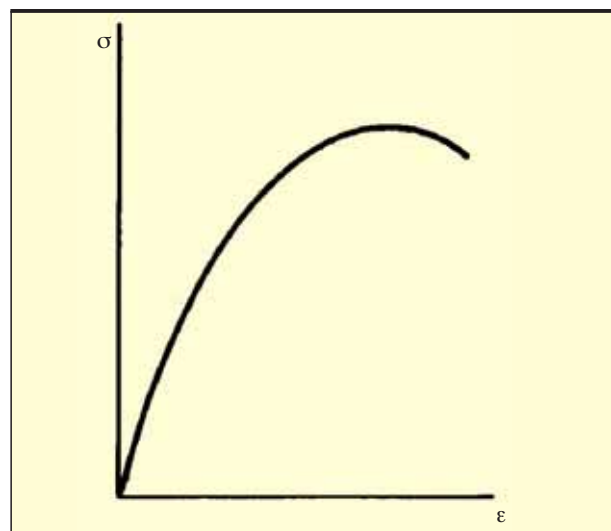


FIGURA 9. Comportamiento plástico tensión- deformación.

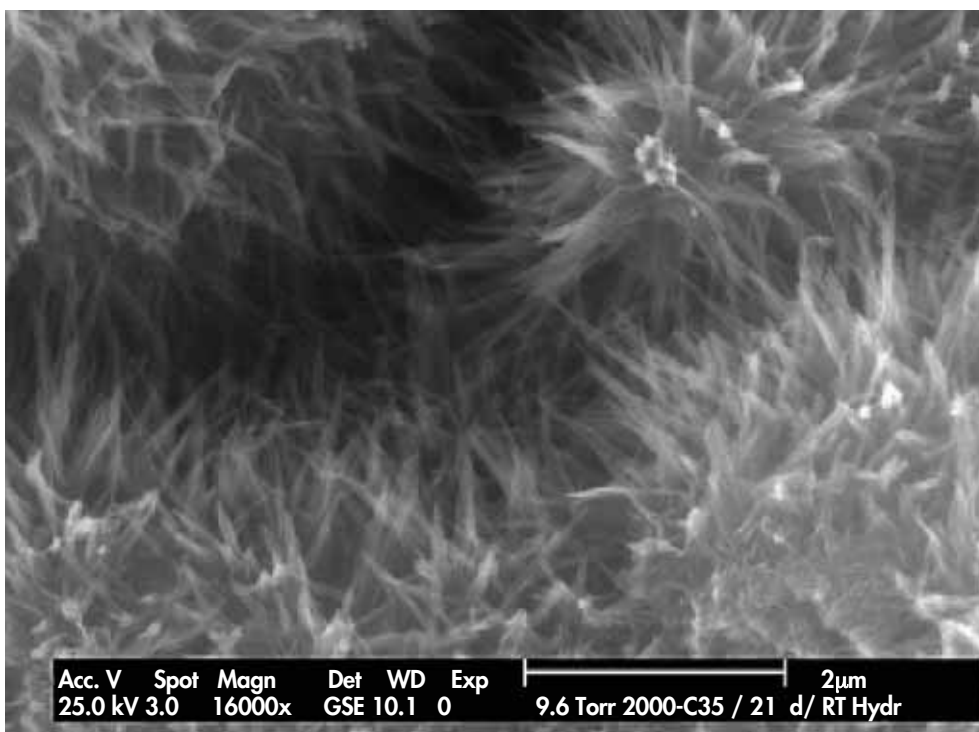


FIGURA 10. Formación de fases CSH aciculares durante la hidratación del mineral de cemento C3S (silicato tricálcico) [5].

dificación y, a continuación, un endurecimiento cada vez más intenso. Si la suspensión de relleno tiene la suficiente estabilidad de sedimentación, la distribución regular de las partículas de aglutinante a través de toda la columna de la suspensión produce una solidificación homogénea en todo el relleno. En este contexto, el material de relleno debería estar compuesto de tal modo que se alcance cuanto antes una resistencia a la presión de, como mínimo, $0,2 \text{ N/mm}^2$ dado que el material de construcción que cumpla dicho criterio se puede considerar estable a la erosión

Si las resistencias finales del material de relleno son del orden de $1 \text{ a } 3 \text{ N/mm}^2$, hay que tener en cuenta que estos valores corresponden aproximadamente al nivel de resistencia de un suelo arcilloso compactado. Interesa que el material de relleno exhiba una cierta plasticidad incluso una vez endurecido. Mientras los cuerpos frágiles fallan de repente incluso en caso de pequeñas deformaciones (figura 8), un comportamiento plástico (figura 9) permite que el cuerpo, en primer lugar, se deforme sin romperse, y que se formen grietas o se produzca la rotura sólo al alcanzarse una deformación de rotura crítica.

FIGURA 11. Régimen de temperatura durante la hidratación de un material de relleno con pocos sólidos para sondeos geotérmicos (medición en condiciones adiabáticas).

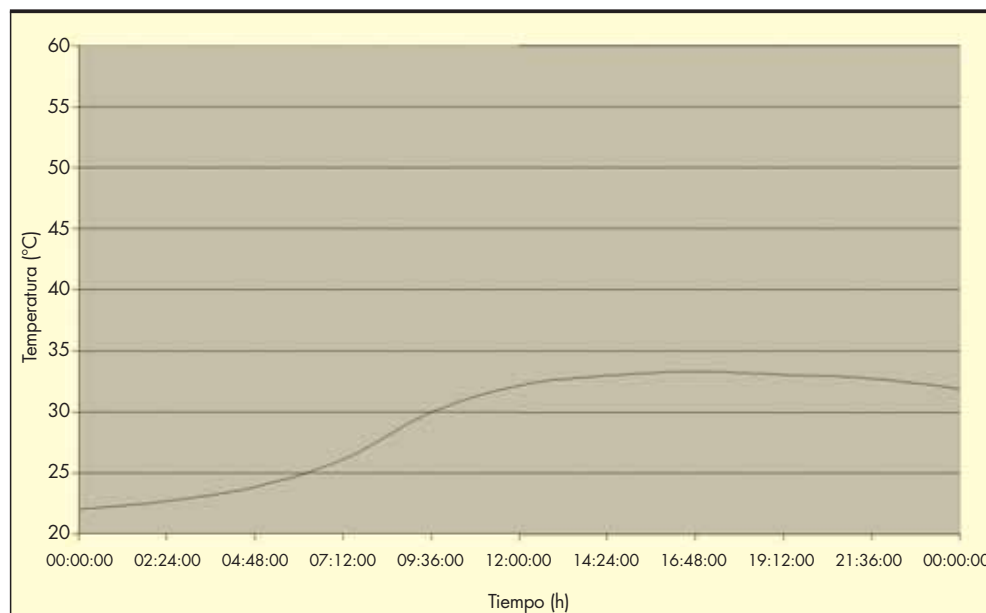
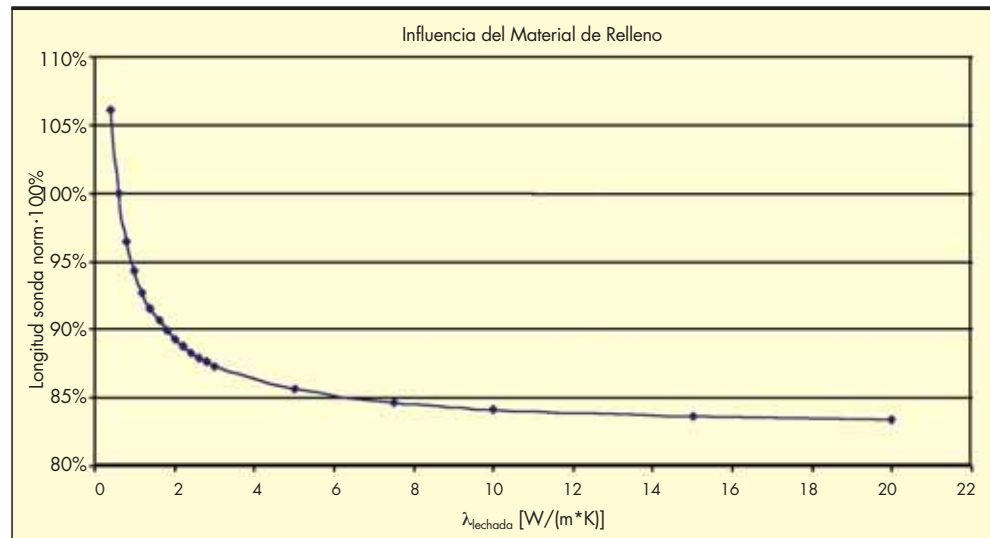


FIGURA 12. Influencia de la conductividad térmica del material de relleno sobre la longitud de la sonda necesaria, manteniéndose constante el rendimiento [7].



La resistencia del material de relleno en base a cemento se desarrolla mediante un proceso químico de hidratación. Debido a la absorción de agua, en la superficie de las partículas de cemento se forman cristales aciculares (fases CSH) (figura 10) que crecen continuamente y que, al final, tapan los intersticios entre las partículas de sólidos. Durante esa reacción se produce calor de hidratación.

El control del calor de hidratación que desprende el material de relleno para sondeos geotérmicos es importante por dos motivos: Por un lado, hay que procurar que el material de construcción no se caliente tanto que dañe los tubos de la sonda. Por otro, debe determinarse en qué momento el desprendimiento de calor de hidratación ha progresado lo suficientemente para que un ensayo de respuesta térmica al que se someta la perforación no resulte alterado.

4.2. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MATERIAL DE RELLENO FRAGUADO

Para alcanzar un flujo calorífico óptimo entre el subsuelo in situ y el fluido en circulación en la sonda, el material de relleno empleado debería tener una conductividad térmica lo más elevada posible.

Por este motivo, se ha desarrollado material de relleno especial con mayor conductividad térmica para sondas geotérmicas. El aumento de la conductividad térmica desde aproximadamente 0,7 W/(m·K) (suspensión de cemento/bentonita) hasta 2,0 W/(m·K) (material de relleno optimizado) produce un aumento del rendimiento de la bomba de calor en hasta un 9%. Alternativamente, se puede reducir la longitud de la sonda manteniéndose constante el rendimiento (figura 12).

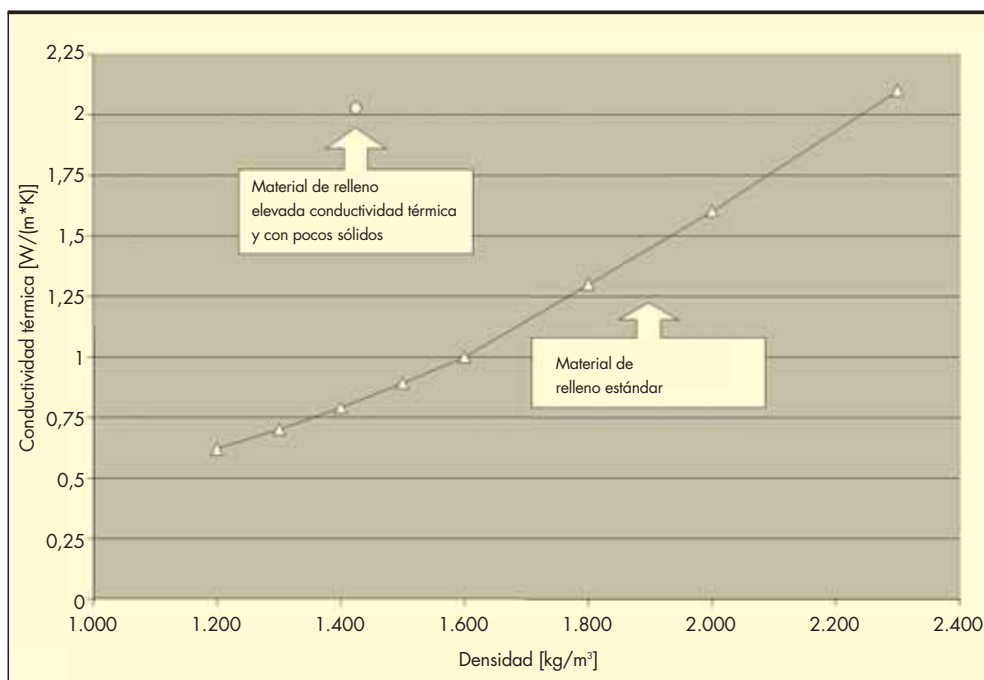


FIGURA 13. Dependencia entre densidad y conductividad térmica de un material de relleno estándar y conductividad térmica de un material de relleno de elevada conductividad térmica y con pocos sólidos, (las propiedades de conductividad térmica del hormigón que se citan corresponden a los promedios obtenidos).

Un modo de incrementar la conductividad térmica de un cuerpo constituido por material de relleno es aumentar el contenido de sólidos en la suspensión (véase figura 13). Sin embargo, en este contexto surge el problema ya mencionado de que el aumento de sólidos puede reducir la fluidez de la suspensión.

Para evitarlo, se han desarrollado composiciones de material de relleno con elevada conductividad térmica y con contenido de sólidos relativamente reducido ($g = 1,5 \text{ g/cm}^3$), por medio de aditivos.

5. EVALUACIÓN AMBIENTAL

Dado que el material de construcción empleado para rellenar las perforaciones efectuadas en relación con sondas geotérmicas está en contacto directo con las aguas freáticas, es muy importante que el material de relleno no sea perjudicial para el agua. Por consiguiente y antes de emplear un material de relleno determinado, hay que solicitar del fabricante un informe sobre la compatibilidad medioambiental del material de construcción. Un certificado ambiental se debe expedir por un instituto de medio ambiente independiente, y con base en resultados de análisis de sólidos y de eluato.

Sin embargo, aunque el material de relleno no contamine el agua, siempre se debe acordar con las autoridades hidrográficas competentes el empleo de material de relleno en zonas de acuíferos protegidos.

El relleno del espacio anular de los sondeos geotérmicos debe servir para evitar que se produzcan cortocircuitos hidráulicos entre diferentes niveles de acuíferos, sin olvidar,

en todo caso, la importancia de las propiedades térmicas del material.

En relación con concursos y autorizaciones hay que tener en cuenta que los materiales de relleno para aplicaciones geotérmicas son sistemas de componentes múltiples. Los requisitos establecidos para esos sistemas sólo se pueden cumplir con toda garantía si los diferentes componentes contenidos en el producto se han combinado adecuadamente, por lo que se deben especificar perfiles concretos de requisitos en los textos de los concursos. Unos términos tan generales, como por ejemplo "suspensión de cemento/bentonita" que tan a menudo se encuentra, no ayudan a garantizar que los materiales utilizados desempeñen correctamente sus funciones.

6. REFERENCIAS

- [1] VDI 4640 (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. – Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.
- [2] BAUMANN, K.; NIEHUES, B.; THOLEN, M. & TRESKATIS, C. (2003): Untersuchungen zur Bestimmung von Qualitätskriterien für Abdichtungsmaterialien im Brunnenbau – Abschlussbericht. – www.dvgw.de/pdf/w1_01_02.pdf
- [3] Libro de Actas GeoEner (2007): Geotermia en la Edificación y en la Industria. Comunicación número 283. Comunidad de Madrid.
- [4] Material procedentes de diferentes proyectos de instalaciones geotérmicas realizados por el equipo de GEOTHERMAL ENERGY S.L.