

Pilotes y pantallas termoactivas. Proceso constructivo y caracterización térmica

ALBERTO MAZARIEGOS (*), LUIS CARLOS ANTÓN (**), RODRIGO VALLE (**), JAVIER URCHUEGUIA (***),
SALVADOR QUILIS (****), SALVADOR MARTÍNEZ (****) y TERESA MAGRANER (****)

RESUMEN La **Cimentación Termoactiva** es una tecnología aplicable a los elementos de las estructuras de hormigón armado de las cimentaciones especiales, “pilotes”, “pantallas” y “losas”, para la obtención de energía para climatización de edificios a partir del subsuelo. Este tipo de cimentación se basa en el aprovechamiento de la temperatura del terreno para aumentar el rendimiento de las bombas de calor geotérmicas.

En estas estructuras de hormigón armado, el intercambio geotérmico se puede realizar por medio de un circuito cerrado instalado en las armaduras de la cimentación. Este circuito cerrado esta formado por tubos de PEAD “sondas geotérmicas”, a través de los cuales circula agua o agua con anticongelante, produciéndose un intercambio de calor entre este fluido y el terreno. El fluido es conducido a una bomba de calor geotérmica “BCG”, generando la energía suficiente para la completa climatización de un edificio.

ENERGESIS, empresa puntera en el campo de la climatización de edificios a través de la energía geotérmica y RODIO KRONSA, empresa puntera en el campo de la ingeniería del suelo, con la colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), han desarrollado una línea de actuación para proyectar y ejecutar instalaciones de ahorro y aprovechamiento energético mediante el uso de la energía geotérmica para edificaciones, asociadas a las cimentaciones.

La necesidad de disponer de un procedimiento de actuación para la ejecución de pilotes y pantallas termoactivas y su caracterización térmica, es el motivo para realizar una serie de pruebas en obra, con la finalidad de verificar el comportamiento térmico de estos dos tipos de cimentación termoactiva.

THERMOACTIVE PILES AND DIAPHRAGM WALLS BUILDING PROCESS AND THERMAL RESPONSE TEST

ABSTRACT *Thermoactive foundation technology uses building foundation, “piles”, “diaphragm wall” and “slabs” as ground heat exchangers to provide buildings with heating and cooling. This type of foundation is based on the use of the ground temperature to enhance the heat pump coefficient of performance (COP).*

In this kind of structures, the heat exchange can be done through a closed circuit installed on the reinforced of the foundation. This closed circuit is made up of HDPE pipes “geothermal probes”, through which water or brine circulates producing a heat exchange between this fluid and the ground. This fluid is led to a geothermal heat pump “GHP”, generating the energy required for air-conditioning a building.

ENERGESIS, leading company in the air-conditioning field using geothermal energy and RODIO KRONSA, leading company in the engineering field of soil and subsoil, with the collaboration of the Universidad Politécnica de Valencia (UPV) and the Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas (UPM), have developed an action line to design and implement savings energy facilities by using geothermal energy associated with the foundations.

A series of tests at work have been done in order to have a procedure to implement the thermal response of thermoactive piles and diaphragm walls.

Palabras clave: Pilote termoactivo, Pantalla termoactiva, Caracterización térmica de pilotes y pantallas, Bombas de calor geotérmico.

Keywords: Energy piles, Thermoactive diaphragm wall, Thermoactive foundations thermal response test, Ground coupled heat pump system.

(*) Departamento de Ingeniería Civil: Tecnología de la Construcción. E.U.I.T.O.P. Universidad Politécnica de Madrid.

(**) RODIO KRONSA.

(***) Departamento de Física Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia.

(****) Energesis Ingeniería.

1. INTRODUCCIÓN

El Código Técnico de la Edificación (CTE), DB-HE “Ahorro de Energía”, exige la aplicación mínima de energías térmicas renovables “solar” y “fotovoltaica” para la edificación y abastecimiento de agua caliente sanitaria, pero deja una puerta abierta a otras energías renovables o alternativas de ahorro energético. Entre estas “otras alternativas” tienen cabida las instalaciones para el aprovechamiento de “energía geotérmica”.

La energía geotérmica de muy baja entalpía, $T^a < 25^{\circ}\text{C}$, se fundamenta en “la capacidad que tiene el suelo y subsuelo para acumular el calor del sol, manteniendo su temperatura constante a lo largo del año, a partir de determinada profundidad”. Una instalación geotérmica es por eso una fuente de “energía renovable sostenible y limpia”.

En España, a partir de los 5 m de profundidad, la temperatura del subsuelo comienza a ser más o menos estable, independientemente de las condiciones meteorológicas exteriores. A partir de los 15 m, la temperatura se estabiliza en torno a los 17°C , fluctuando cada vez menos con la profundidad y aumentando en función del gradiente geotérmico. La consiguiente estabilidad térmica supone que en verano el subsuelo esté considerablemente más fresco que el ambiente exterior y en invierno a una temperatura más favorable de la existente en el exterior.

La Cimentación Termoactiva es una tecnología aplicable a los elementos de las estructuras de hormigón armado de las cimentaciones para la obtención de energía para climatización de edificios a partir del subsuelo y el agua subterránea. Se basa en el aprovechamiento de la temperatura del terreno para aumentar el rendimiento de las “bombas de calor”. Estas funcionan básicamente en dos condiciones: en “modo calefacción” transfieren calor del subsuelo al edificio, mientras que en “modo refrigeración” actúan a la inversa, al eliminar el calor que genera el edificio conduciéndolo al subsuelo.

En las estructuras de hormigón armado de cimentaciones especiales “pilotes” y “pantallas”, el intercambio geotérmico se realiza por medio de un circuito cerrado instalado en las armaduras de la cimentación. Este circuito cerrado está formado por tubos de PEAD “sondas geotérmicas” a través de los cuales circula agua o agua con anticongelante, produciéndose un intercambio de calor entre este fluido y el terreno. El fluido es conducido a una bomba de calor geotérmica “BCG” generando la energía suficiente para la completa climatización de un edificio.

Dentro de las cimentaciones termoactivas, se han desarrollado dos líneas de actuación, clasificadas por el procedimiento constructivo, en los siguientes tipos:

- Pilotes termoactivos:
 - Pilote Termoactivo hormigonado “in situ”.
 - Pilote Termoactivo prefabricado hincado.
- Pantallas termoactivas:
 - Pantalla continua termoactiva.

Los “pilotes termoactivos” se definen como una cimentación profunda (función resistente) con la capacidad de llevar a cabo intercambio geotérmico (función térmica) con el subsuelo y el agua subterránea.

Las “pantallas termoactivas” se definen como un elemento de contención de tierras para realizar excavaciones verticales (función resistente) con la capacidad de llevar a cabo intercambio geotérmico (función térmica) con el subsuelo y el agua subterránea.

En este artículo se presentan las actuaciones llevadas a cabo para el desarrollo de estas dos líneas de actuación, pilotes y pantallas termoactivas, así como para la realización de las medidas de conductividad térmica que han permitido verificar su comportamiento térmico.

2. PILOTES TERMOACTIVOS

2.1. PILOTE TERMOACTIVO HORMIGONADO “IN SITU”. PROCESO CONSTRUCTIVO

Este tipo de pilote lo ha realizado RODIO, para la cimentación del Complejo T-23, hangares y oficinas, de EADS CASA en Getafe, Madrid.

2.1.1. Naturaleza y características del terreno

La zona ocupada por Madrid y sus alrededores puede incluirse en el esquema típico de sedimentación en una cuenca continental cerrada en condiciones subdesérticas: sedimentos detríticos en el borde y evaporíticos en el interior, con una zona intermedia en la que se produce deposición mixta de materiales detríticos interestratificados de materiales neoformados.

La franja norte del alfoz de Madrid está constituida, a partir de las formaciones rocosas del macizo de Guadarrama, por sedimentos típicamente rocosos del macizo de Guadarrama, por sedimentos típicamente detríticos, con proporciones decrecientes de elementos gruesos y disminución del tamaño máximo de los mismos al irse alejando de la Sierra.

La ciudad de Madrid está situada en una zona afectada por los tres tipos de sedimentos citados, y así, al moverse en dirección transversal a la Sierra, de NO a SE de la capital, se pasa de las facies detríticas (arena de miga y tosco) a las intermedias (peñuelas), para terminar con las evaporíticas (yesos).

En la zona en la que se inscribe el municipio de Getafe, franja sur del alfoz, los sedimentos terciarios están constituidos por facies típicamente evaporíticas, y lo conforman niveles subhorizontales de arcillas y margas marrones y grises, duras, con intercalaciones de yesos tableados y nodulares. Estas intercalaciones de yesos presentan espesores variables, desde niveles milimétricos a métricos. En general, estos niveles no están carstificados.

La capa superficial de la parcela, está constituida por un relleno arcillo limo arenoso. Infrayacente al nivel de relleno, se describe una serie de niveles constituidos por limos y arcillas de tonos grisáceos a techo y margas yesíferas y yesos masivos a muro pertenecientes a las facies interiores de la cuenca, Tabla 1.

Litología	0,00–2,00 m. Arcilla limo arenosa marrón. Relleno. 2,00–7,00 m. Limos y limos arcillosos grises y marrones. 7,00–13,00 m. Arcillas y limos grisáceos. 13,00–20,00 m. Margas yesíferas y yesos masivos.
Nivel freático	–3,00 m.
Calidad del agua	Agresiva por sulfatos.

TABLA 1. Características del terreno.



FIGURA 1. Detalle de la fijación de las sondas geotérmicas a la armadura del pilote.

TABLA 2. Distribución de pilotes y sondas geotérmicas.

Zona	Nº de pilotes	Nº de sondas por pilote	Nº de sondas	ML de armadura por pilote	ML de sondas
Oficinas	196	2	392	14	5.488
Hangar 2	25	2	50	14	700
Área 3	22	2	44	14	616
TOTAL	243		486		6.804

2.1.2. Características del pilote termoactivo hormigonado "in situ"

CAVEGA contrató a RODIO la ejecución de la cimentación, mediante pilotes termoactivos, del Complejo T-23, hangares y oficinas, de EADS CASA en Getafe, Madrid.

El tipo de pilote realizado fue un pilote hormigonado "in situ", perforado con barrena continua de diámetro 620 mm, de 17 m de profundidad media, con una longitud de armadura de 14 m. Se realizó de acuerdo con el PEC-03, de RODIO.

El diámetro del pilote, 620 mm, permite la instalación de 2 sondas geotérmicas por pilote, sin que se produzcan, en principio, interferencias en su comportamiento térmico. Las sondas se colocaron a lo largo de los 14 m de longitud de la armadura del pilote, Figura 1.

La distribución de los pilotes y sondas geotérmicas fue la mostrada en la Tabla 2.

La perforación de los pilotes se realizó con el equipo CM.-70 de barrena continua (BC). El hormigonado se realizó mediante el bombeo del hormigón, tipo HA-30/L/20/IIa+Qb, por el interior de la barrena continua, que es hueca, y extracción simultánea de ésta, que lleva alojada en sus alabes el terreno perforado. Durante el proceso de hormigonado, se combina adecuadamente la velocidad de ascensión de la barrena, el caudal del hormigonado y la presión a que se realiza el mismo con el fin de evitar cortes en el fuste del pilote o sobreesesiones y excesos de hormigón innecesarios. Finalizado el hormigonado se procede a la limpieza de la zona del pilote para la posterior colocación de la armadura. En la Figura 2, aparece el equipo CM.-70 durante la perforación.

Finalizado el proceso de hormigonado del pilote, se introduce la armadura equipada con las sondas geotérmicas en el



FIGURA 2. Equipo de perforación CM.-70.

hormigón con la ayuda de un vibrador, y una vez concluida su colocación se procede a la colocación de las protecciones pertinentes en las barras de la armadura, así como tuberías de protección para las sondas geotérmicas instaladas en el pilote, Figura 3.

Antes de iniciar las medidas de conductividad térmica para verificar el comportamiento del pilote en este tipo de terreno, se espera un tiempo estimado de 14 días, para el fraguado y enfriamiento del hormigón. Se pretendía evitar la interferencia térmica producida por este proceso.



FIGURA 3. Colocación de la armadura del pilote termoactivo y pilotes termoactivos terminados.

2.2. PILOTE TERMOACTIVO PREFABRICADO HINCADO. PROCESO CONSTRUCTIVO

La prueba con el pilote termoactivo prefabricado hincado han tenido dos fases diferenciadas. La primera, la fabricación de 8 pilotes de sección cuadrada, CK 300, en la factoría de KRONSA en Algete y la segunda, la hinca de cuatro de estos pilotes en la parcela SU - 24.2, propiedad de AMR Refractarios Hernani S.A., en el polígono industrial Ibaiondo, Hernani (Guipúzcoa), donde KRONSA estaba realizando la cimentación de varias naves con este tipo de pilotes.

2.2.1. Naturaleza y características del subsuelo

Los materiales naturales presentes en la zona están representados por depósitos aluviales del Cuaternario en contacto discordante sobre una alternancia de margas y calizas arenosas del Flysch detrítico-calcareo del Cretácico Superior, de la Unidad Estructural San Sebastián, en la zona noreste de la Cuenca Vasco-Cantábrica.

La capa superficial de la parcela, está ocupada por un paquete de rellenos antrópicos heterogéneos compuestos por una trama granosoportada de gravas, bolos y bloques poligénicos de caliza, ofita y escorias de fundición con matriz arenolimosas. Infrayacente al nivel de rellenos se describen depósitos aluviales del Cuaternario, constituidos por depósitos finos, arcillas y limos arenosos, y gruesos, gravas con arenas y limos, del río Urumea, Tabla 3. El sustrato rocoso (Cretácico Superior), está constituido por margas y lutitas calcáreas limosas que alternan en bancos centimétricos a métricos con calizas arenosas y areniscas calcáreas.

2.2.2. Características del pilote termoactivo prefabricado

El pilote termoactivo prefabricado, donde se han realizado las medidas de conductividad térmica, es un “pilote prefabricado de sección cuadrada CK-300”, habitualmente utilizado por la empresa KRONSA, especialista en la realización de este tipo de cimentaciones con pilotes prefabricados. Para la prueba prevista se fabricaron 8 pilotes (2 pilotes de cada tipo) en la factoría de KRONSA en Algete (Madrid). Las características de estos pilotes se reflejan en la Tabla 4.

Litología	0,00–4,50 m. Gravas y bolos con matriz arenolimosas. Rellenos. 4,50–19,00 m. Gravas, bolos y limos arenosos. Aluvial. 19,00–25,00 m. Argilitas y limonitas con niveles de calizas arenosas.
Nivel freático	–5,00 m.
Calidad del agua	No agresiva.

TABLA 3. Características del terreno.

Denominación	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Lado aproximado	300 mm	300 mm	300 mm	300 mm
Longitud	12,00 m	12,00 m	12,00 m	12,00 m
Nº de sondas geotérmicas por pilote	1,00	1,00	1,00	1,00
Distancia del pie de sonda al Azuche	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
Nº de pilotes fabricados	2	2	2	2

TABLA 4. Características del pilote termoactivo prefabricado. *Fecha de fabricación: 4 de febrero de 2008. *Fecha de hincado 3 Marzo de 2008.



FIGURA 4. Detalle de la fabricación de los pilotes y los pilotes termoactivos almacenados fuera de los moldes.

La fabricación de cuatro tipos de pilote, diferenciando únicamente la distancia del pie de sonda al pie del pilote “azúcar”, se ha realizado con el fin de comprobar si durante la hincada del pilote el pie de la sonda geotérmica sufre alguna alteración.

La fabricación se ha realizado en la Factoría de Pilotes que la empresa KRONSA tiene en Algete (Madrid). Los pilotes prefabricados CK cuentan con los sellos CE (UNE EN 12794:2006) y N certificado por AENOR que garantiza su fabricación.

Las dimensiones del pilote propuesto, 300 x 300 mm, permite la instalación de una sola sonda geotérmica ya que más de una haría que se produjeran interferencias en su comportamiento térmico.

En la Figura 4 se observan los detalles de la armadura, pletina de protección y sonda geotérmica en los moldes durante el proceso de hormigonado, y los pilotes termoactivos almacenados, listos para su transporte a obra.

La hincada de cuatro (4) pilotes termoactivos (uno de cada tipo fabricado, creando un encepado con una distancia entre centros de pilote de 1 m), se llevó a cabo con un equipo JUNTAN PM 25 HLC 1450, con martillo de 9 Tn. Finalizada la hincada se procedió al descabezado de los pilotes y verificación de su estanqueidad, Figura 5.

2.3. PILOTE TERMOACTIVO. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA TÉRMICA DEL SUELO

La caracterización de la respuesta térmica del suelo mediante la realización de medidas “in situ” se introdujo en Suecia y Estados Unidos en 1995, y se ha desarrollado desde entonces en otros países.

Existen diferentes modelos analíticos y numéricos para evaluar la respuesta térmica del suelo. En EE.UU y Canadá es frecuente emplear modelos cilíndricos conjuntamente con técnicas de estimación de parámetros, mientras que en Europa el método más empleado, y el que se ha seguido en este



FIGURA 5. Hincada de los pilotes termoactivos y detalle de un pilote descabezado con las sondas geotérmicas.

trabajo, es el de la **línea infinita** debido a su simplicidad y a la rapidez de su aplicación.

El modelo de línea infinita se basa en la aproximación de que el intercambiador vertical es una fuente lineal infinita, considerando el suelo como un medio homogéneo a una temperatura inicial constante T_g . El modelo inicial fue desarrollado por Lord Kelvin; Ingersoll and Plass (1948) aplicaron el modelo a los intercambiadores de calor enterrados, mientras que investigaciones posteriores han validado el uso de este modelo para la estimación de las propiedades térmicas del suelo (Mogensen, 1983; Kavanaugh, 1984; Austin, 1998; Gehlin, 1998).

El modelo aproxima el proceso de extracción o inyección de calor mediante la fórmula:

$$T_f = \frac{-(q_v \rho c (T_{out} - T_{in}))}{4\pi\lambda H} \left[\ln \left[\frac{4at}{r_0^2} \right] - \gamma \right] + \frac{q_v \rho c (T_{out} - T_{in}) R_b}{H} + T_g \quad (1)$$

donde:

T_f : temperatura media del bucle enterrado.

q_v : caudal circulante.

ρ : densidad fluido circulante.

c : calor específico fluido circulante.

T_{out} : temperatura de retorno del bucle enterrado.

T_{in} : temperatura ida al bucle enterrado.

T_g : temperatura estable del suelo.

λ : conductividad térmica del suelo.

H : longitud tubería enterrada.

R_b : resistencia térmica del bucle enterrado.

γ : constante de Euler.

t : tiempo.

r_0 : diámetro perforación.

k : coeficiente de regresión T_f con $\ln(t)$.

a : difusividad térmica.

Esta expresión puede emplearse bajo la siguiente condición:

$$t \geq \frac{5r_0^2}{a}$$

Por lo que las propiedades térmicas se pueden estimar con los datos medidos en el ensayo como:

$$\lambda = \frac{-(q_v \rho c (T_{out} - T_{in}))}{4\pi H k} \quad (2)$$

y una vez obtenida la conductividad térmica (λ) se puede calcular la resistencia térmica del bucle enterrado (R_b) mediante la expresión (1).

La caracterización de ambos tipos de pilotes termoactivos la ha realizado ENERGESIS mediante el ensayo conocido como "**Thermal Response Test**" consistente en someter al terreno, durante un periodo predeterminado, nunca inferior a 60 horas, a una inyección o extracción de calor constantes mediante ensayos de inyección térmica a potencia constante. Este ensayo simula el comportamiento al que se vería afectado el pilote si se estuviera trabajando en modo refrigeración, mientras que el ensayo de extracción equivale al funcionamiento del sistema en calefacción.

A lo largo del proceso se van registrando teleméricamente las lecturas de temperatura a la entrada y salida del bucle geotérmico. La evolución temporal de dichas temperaturas permite, mediante ajuste al modelo de la **línea infinita**, obtener parámetros como la conductividad térmica efectiva y resistividad térmica del pilote. Dichos parámetros resultan críticos para conseguir diseños geotérmicos con relaciones óptimas entre la longitud del intercambiador y la energía inyectada o extraída del terreno.

De esta manera se procede a inyectar un flujo de calor constante, controlando el caudal de agua inyectado y las temperaturas a la entrada y salida de las sondas geotérmicas, Figura 6. Finalmente se obtiene una gráfica que muestra la evolución de la temperatura media entre la entrada y la salida en función del tiempo.

Los resultados de los ensayos de caracterización térmica de ambos pilotes se muestran en los siguientes apartados.

2.3.1. Pilote termoactivo hormigonado "in situ"

La caracterización del pilote termoactivo realizado se ha llevado a cabo mediante ensayo de inyección térmica a potencia constante, Tabla 5.

El ensayo de inyección ha consistido en someter al pilote durante un tiempo determinado a una potencia constante, este ensayo simula el comportamiento al que se vería afectado el pilote si estuviéramos trabajando en modo refrigeración. De esta manera se procede a inyectar un flujo de agua constante a una temperatura determinada por la entrada de las sondas geotérmicas (conectadas en serie) registrando el valor de dicha temperatura y la que se obtiene a la salida de las sondas geotérmicas (ver Figura 6). Así se va registrando la evolución de



FIGURA 6. Esquema del ensayo de caracterización térmica del suelo y prototipo móvil para realizar medidas de conductividad térmica.

Ensayo	Ensayo 1
Profundidad efectiva de transmisión de calor (m)	14
Diámetro de pilote (mm)	620
Sondas introducidas (ud)	2 (simples)
Conexión de las sondas	En serie
Flujo de agua inyectado (m ³ /h)	0,25
Salto térmico mantenido (°C)	3
Potencia inyectada (W)	869,77
Potencia inyectada por metro de pilote (W/m)	62,13
Tiempo de ensayo (horas)	75,00

TABLA 5. Características del ensayo realizado en el pilote termoactivo hormigonado "in situ".

estas temperaturas a lo largo del tiempo. Finalmente se obtendrá una gráfica que muestra la evolución de la temperatura media entre la entrada y la salida en función del tiempo.

En la Figura 7, se puede observar la potencia total del pilote y la potencia por metro de perforación térmica efectiva a la que se ha sometido el pilote en el ensayo. Se ha inyectado una potencia de 62,13 W/m. En la Figura 8, se puede ver la evolución de todos los parámetros de control (temperatura de entrada al pilote, temperatura de salida, temperatura ambiente, caudal) que se han medido a lo largo del ensayo.

En el análisis de datos se ha despreciado la toma de datos durante las 6 primeras horas, por considerarse un período no estabilizado del sistema. En la Figura 8, se observan pequeñas oscilaciones que se deben tanto a interferencias producidas por fluctuaciones diarias de la temperatura ambiente, como a una inyección de potencia del terreno no estrictamente constante, que presenta una desviación típica de un 7,2 %.

En la Figura 9 se representa la temperatura media del fluido (**T_f**) en función del **ln** del tiempo. La pendiente de la gráfica representa el coeficiente de regresión que nos permitirá hallar la conductividad térmica del suelo.

La pendiente de la gráfica representa el coeficiente de regresión que nos permitirá hallar la conductividad térmica del suelo. Se observa que la conductividad del suelo es de:

$$K = 1,02 \pm 0,174 \text{ W / mK}$$

La resistencia térmica asociada al pilote calculada a partir de la conductividad obtenida en el terreno es de:

$$R_b = 0,14 \text{ K / (W/m)}$$

2.3.2. Pilote termoactivo prefabricado hincado

Los ensayos se han realizado considerando que en la tipología de pilotes prefabricados, como tienen poca profundidad efectiva (unos 12 m.), el intercambio de calor se ve condicionado por la evolución de la temperatura ambiente (la temperatura del terreno es estable a profundidades mayores de 5 metros, en los primeros metros la evolución de la temperatura del terreno queda amortiguada y desfasada respecto a la ambiente).

Se han llevado a cabo dos ensayos, uno de inyección y otro de extracción, con valores de potencia constante inyectada, Tabla 6.

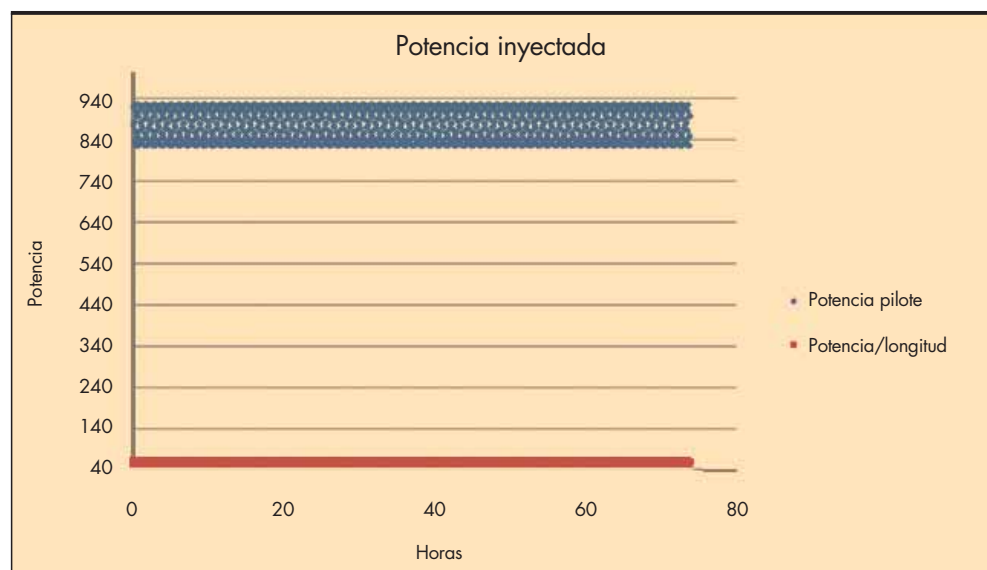


FIGURA 7. Potencia inyectada /longitud del pilote.

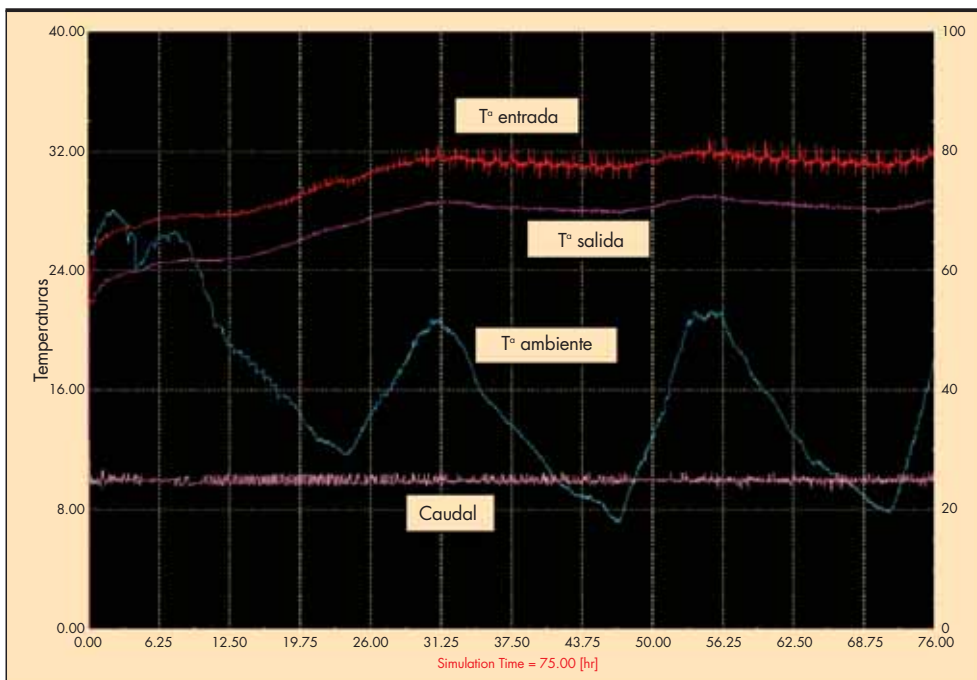


FIGURA 8. Evolución de los parámetros de control.

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 10 y 11.

En la Figuras 10 y 11, se muestra la evolución de la temperatura ambiente y la temperatura media de entrada y salida en cada uno de los ensayos.

Teniendo esto en cuenta, la selección de los ratios de potencia inyectada para cada ensayo se ha realizado con los siguientes criterios;

- 60 W/m en condiciones de temperatura ambiente favorable, en esta ubicación “modo refrigeración” (inyección).
- 30 W/m en condiciones de temperatura ambiente desfavorable, en esta ubicación “modo calefacción” (extracción).

3. PANTALLAS TERMOACTIVAS

3.1. PANTALLA CONTINUA TERMOACTIVA. PROCESO CONSTRUCTIVO

En la remodelación que está llevando a cabo el Ayuntamiento de San Sebastián del aparcamiento subterráneo de La Concha en la Plaza de Cervantes, RODIOKRONSA ha realizado las pantallas continuas termoactivas del nuevo aparcamiento, para la UTE Ferrovial-Moyua.

La remodelación del actual aparcamiento va a consistir en la ampliación del número de plantas, pasando de las 2 actua-

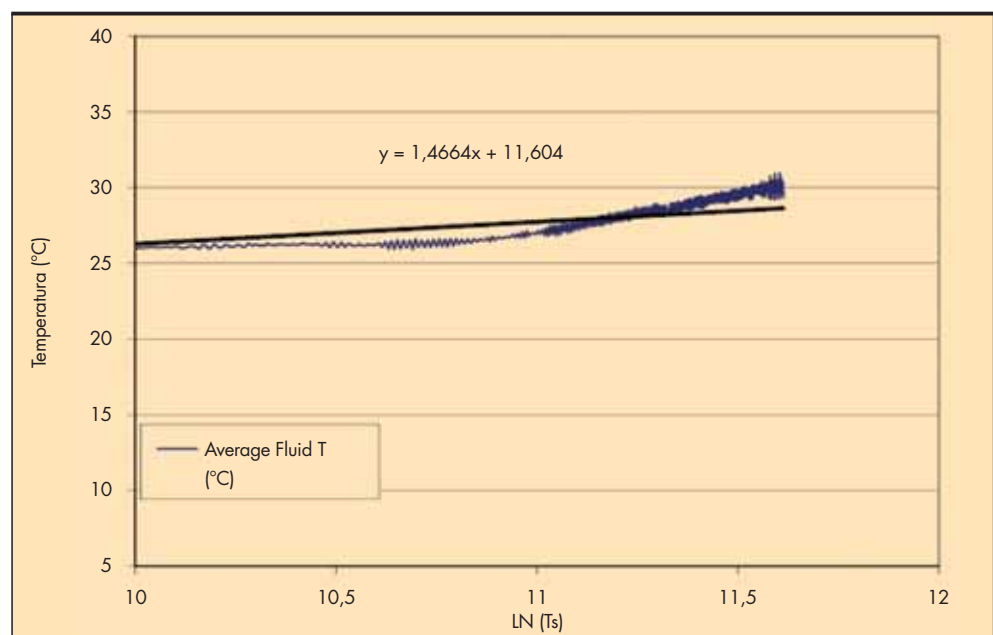


FIGURA 9. Temperatura media del fluido/Ln del tiempo.

TABLA 6. Características de los ensayos realizados en los pilotes termoactivos prefabricados.

Ensayo	Ensayo 1 (Inyección)	Ensayo 2 (Extracción)
Número de pilotes (encepado de 4 pilotes)	3	3
Distancia entre centros de pilote (m)	1	1
Profundidad efectiva de transmisión de calor (m)	$3 \times 11,5 = 34,5$	$3 \times 11,5 = 34,5$
Dimensiones de pilote (cm)	30	30
Sondas introducidas por pilote (ud)	1 (simple)	1 (simple)
Conexión de las sondas	En serie	En serie
Flujo de agua inyectado (m ³ /h)	0,60	0,30
Salto térmico mantenido (°C)	3	3
Potencia inyectada (W)	2.087,45	1.045,00
Potencia inyectada por metro de pilote (W/m)	60,49	30,28
Tiempo de ensayo (horas)	69,50	63,50



FIGURA 10. Ensayo 1. Inyección.

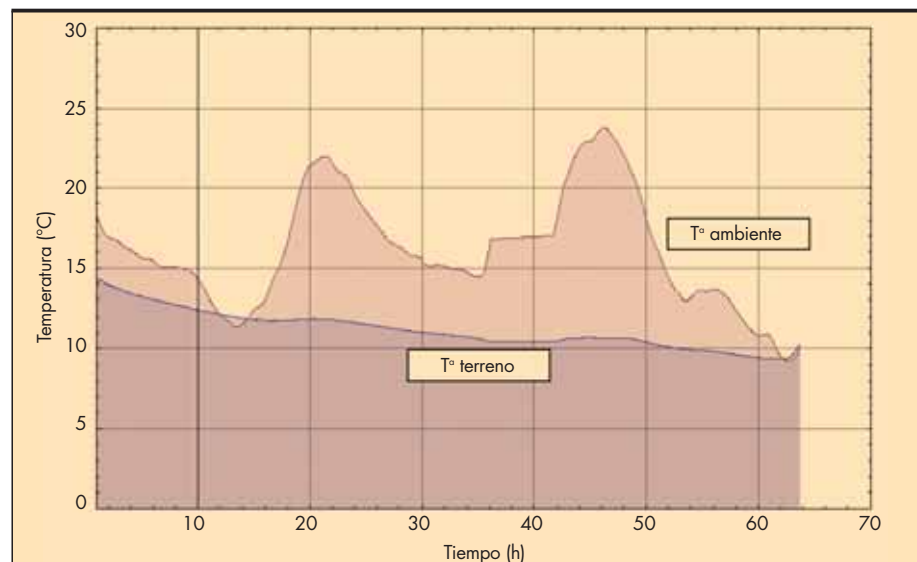


FIGURA 11. Ensayo 2. Extracción.

Litología	0,00–6,00 m. Grava con arcilla y arena. Relleno. 6,00–45,00 m. Arena de playa y arena limosa. Aluvial de origen marino. 45,00–47,00 m. Calizas arcillosas y margocalizas. Sustrato rocoso.
Nivel freático	–6,00 m (+1,00 m.s.n.m.)
Calidad del agua	Agua de mar.

TABLA 7. Características del terreno.

les, a 5 plantas de sótano, e integración, dentro del área de aparcamiento de un espacio para la práctica deportiva de personas discapacitadas.

3.1.1. Naturaleza y características del terreno

Los materiales naturales presentes en la zona están representados por depósitos aluviales de origen marino del Cuaternario en contacto discordante sobre una alternancia de margas y calizas arenosas del Flysch detrítico-calcareo del Cretácico Superior, de la Unidad Estructural San Sebastián, en la zona noroeste de la Cuenca Vasco-Cantábrica.

El aparcamiento de La Concha se ubica sobre unos rellenos antrópicos que descansan sobre una terraza aluvial de origen marino de naturaleza arenosa. El sustrato rocoso (Cretácico Superior) aparece a 30 m de profundidad junto al hotel Londres y a 45 m junto al parque Alderdi Eder y está constituido por calizas arcillosas y margocalizas, Tabla 7.

3.1.2. Características de la pantalla continua termoactiva

La UTE Ferrovial-Moyua contrató a RODIOKRONSA la ejecución de la pantalla continua termoactiva del aparcamiento subterráneo de La Concha en la Plaza de Cervantes, en San Sebastián.

Este tipo de pantalla continua ha sido realizada con **hidrofresa**, de 800 mm de espesor y 40 m de profundidad media, con una longitud máxima de armadura de 32,50 m. La pantalla se ha realizado de acuerdo con el PEC-24, de RODIO.

La dimensión de la armadura máxima, 2,85 x 32,50 m, permite la instalación del colector geotérmico acoplado a esta en el lado terreno. El colector geotérmico instalado en esta armadura tiene una longitud de 180 metros, formado por 3 bucles de 60 m de longitud cada bucle. La sonda se colocó a lo largo de los 32,50 m de longitud de la armadura de la pantalla, Figura 12.

El total de paneles con colectores geotérmicos y el total de metros lineales instalados se refleja en la Tabla 8. Los paneles o bataches están formados, en general por dos columnas de armadura.

La perforación de las pantallas se realizó con una hidrofresa, Evolution III, de Rodio. Se trata de una grúa LIEBHERR HS 875HD modificada ligeramente a la que se le incorpora, el conjunto de la fresa.

La perforación con hidrofresa, al contrario que el resto de sistemas convencionales, es una actividad continua y perfectamente estructurada, que da lugar a un ciclo de trabajo formado por cuatro fases interrelacionadas entre sí:

1. Fabricación y almacenamiento del lodo de perforación.
2. Impulsión del lodo hacia el panel de trabajo de la hidrofresa.
3. Perforación continua con hidrofresa e impulsión de retorno hacia la planta del material excavado mezclado con el lodo de perforación.
4. Separación del material excavado y del lodo de perforación, lodo que a su vez se incorpora a la impulsión hacia el panel de trabajo de la hidrofresa.



FIGURA 12. Detalle del colector geotérmico fijado a la armadura de la pantalla.

TABLA 8. Total de paneles con colector geotérmico.

Nº de paneles con colector	Nº de armaduras por panel (m)	Longitud media armadura (m)	ML de colector geotérmico
40	2	27,50	12.800



FIGURA 13. Hidrofresa Evolution III.

En la perforación de los bataches, ya sean arranques, cierres o intermedios, la hidrofresa realiza, en el panel estándar de 6,40 m, una primera perforación de 2,85 m de ancho (es el ancho de corte) de la totalidad de la perforación (a falta de realizar la limpieza y el desarenado) en uno de los extremos del batache, y a continuación lo mismo en el otro extremo, dejando sin realizar la parte central que será la última a realizar. Durante la perforación de los paneles, se mantendrá la zanja en todo momento

llena de lodos bentoníticos. En la Figura 13, aparece el equipo Evolution III durante la perforación de un panel.

Una vez el panel esté limpio y listo para proceder a su hormigonado, se introducen las armaduras con los colectores geotérmicos instalados, tomando las precauciones propias de cualquier tipo de pantalla, Figura 14. El hormigonado de los paneles se lleva a cabo de abajo hacia arriba a través de la tubería Tremie, de forma que el hormigón desplace al lodo de perforación, que será bombeado hacia la planta para su recuperación. Finalizada la pantalla se procede a su descabezado y verificación de la estanqueidad de los colectores.

Antes iniciar las medidas de conductividad térmica, que permitieran verificar el comportamiento térmico de la pantalla en este tipo de terreno, se controló la evolución de la temperatura del fraguado de la pantalla. A los 20 días se consideró que la interferencia térmica producida en el terreno por el proceso de fraguado había desaparecido.

3.2. PANTALLA CONTINUA TERMOACTIVA. CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA TÉRMICA DEL SUELO

La caracterización de la pantalla continua termoactiva, al igual que en los pilotes termoactivos, la ha realizado ENERGESIS mediante el ensayo “**Thermal Response Test**”. La pantalla en la que se ha realizado el ensayo está constituida por un panel de 0,80 m de espesor, 2,85 m de ancho y 32,50 m de profundidad, en la que se ha instalado el colector geotérmico en el lado del terreno acoplado a la armadura de la pantalla. Este panel se sitúa a 15 m de distancia del mar, en la playa de La Concha. El colector geotérmico instalado tiene una longitud de 180 metros formado por 3 bucles de 60 m de longitud cada bucle.

Se ha realizado la caracterización térmica de la pantalla introduciendo en el colector geotérmico varios niveles de potencia y se han chequeado las variaciones de temperatura de la entrada y de la salida del colector obteniendo una curva de evolución de temperatura a lo largo del tiempo. Para inyectar los diferentes escalones de potencia se ha impulsado diferentes niveles de caudal y se ha mantenido constante el salto térmico entre la entrada y la salida, Tabla 9.



FIGURA 14. Colocación de la armadura de la pantalla y pantalla termoactiva terminada.

TABLA 9. Caudales de inyección y salto térmico mantenido.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Caudal (m ³ /s)	0,7	1,0	1,2
Salto térmico (ΔT)	3°C	3°C	3°C

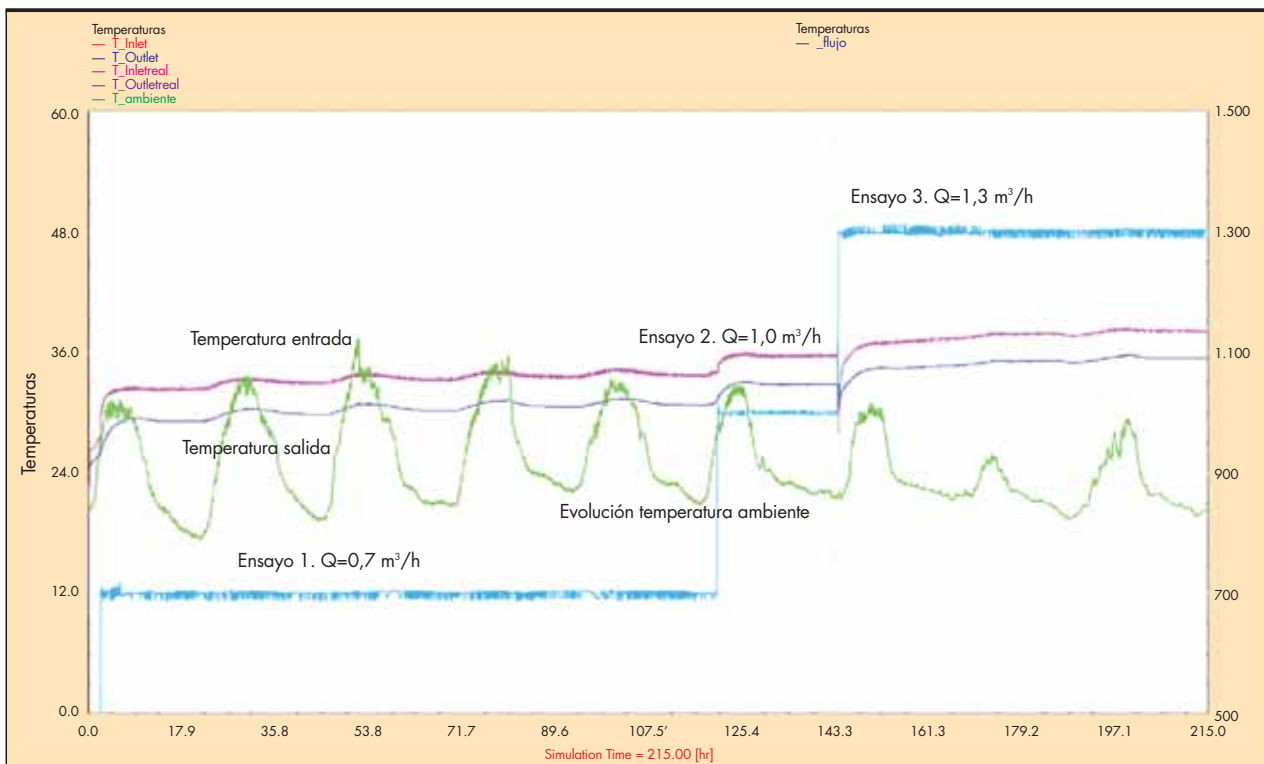


FIGURA 15. Evolución de las temperaturas de la pantalla y caudal inyectado.

3.2.1. Validación del modelo realizado

En la gráfica obtenida, Figura 15, se aprecia la evolución de las temperaturas de entrada y salida del colector y el caudal inyectado en la pantalla. En esta se observa una fuerte depen-

dencia entre estas temperaturas y la ambiente, esto es debido a la longitud de tubería existente entre el laboratorio móvil y la pantalla termoactiva. Dicha tubería tiene una longitud de 25 metros tanto la de ida como la de retorno entre el test y la

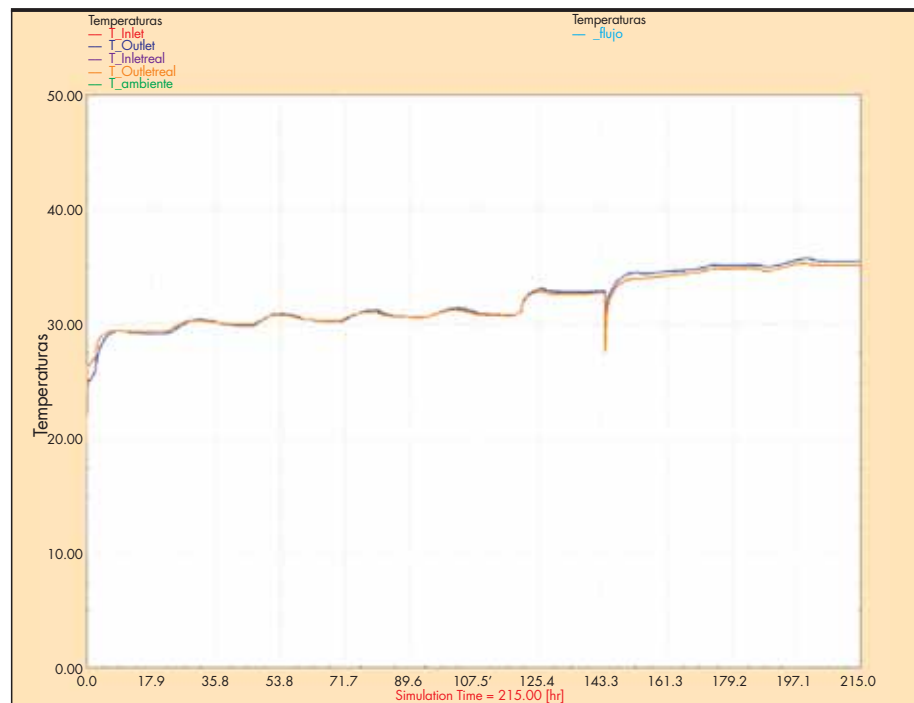


FIGURA 16. Comparativa entre los outputs reales y del modelo.

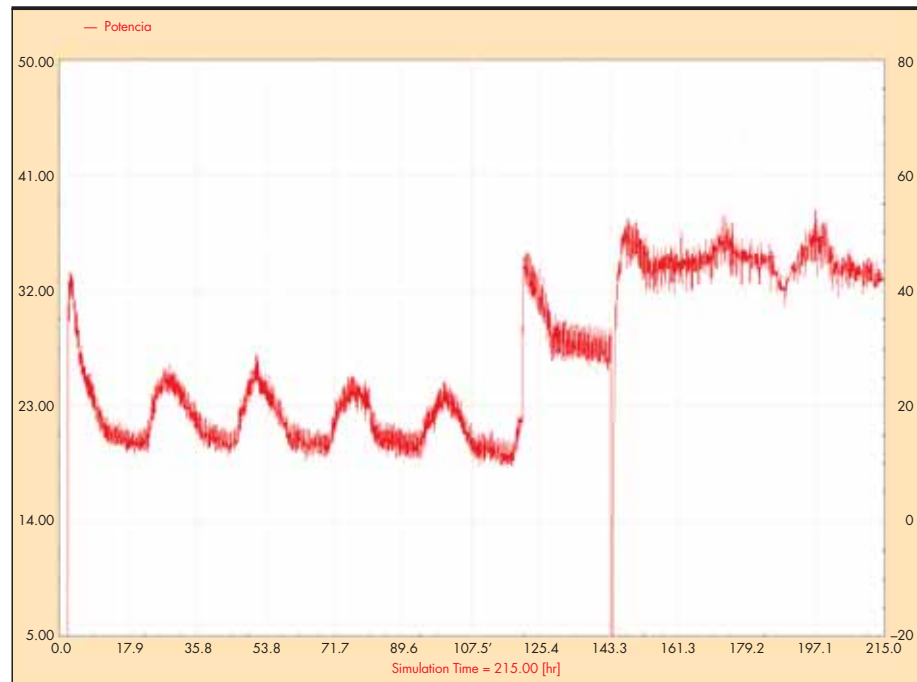


FIGURA 17. Evolución de la potencia inyectada a la pantalla.

pantalla. Para minimizar los efectos de aporte de calor, estas tuberías fueron aisladas y protegidas.

A partir de los datos obtenidos se verifica el **modelo de transferencia de calor específico** desarrollado para este caso, frente al comportamiento real de la pantalla termoactiva para dar validez al modelo.

El modelo implementado ha tenido en cuenta los aportes de calor generados por la red de tuberías de conexiones entre el laboratorio y las conexiones de la pantalla. Para validar el modelo se realiza una simulación con los parámetros reales del

ensayo realizado y se comparan los resultados, los reales y los simulados, Figura 16. De esta manera se van ajustando las variables desconocidas hasta que se obtiene un error entre los resultados por debajo de un valor preestablecido.

En esta gráfica se observa que se produce un buen acople entre la curva del modelo y los datos reales obtenidos, con un error máximo entre las dos curvas de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Debido al aporte de potencia de la red de tuberías de conexión ya comentada, el ensayo realizado ha sido a potencia variable a lo largo del tiempo. La potencia inyectada a la panta-

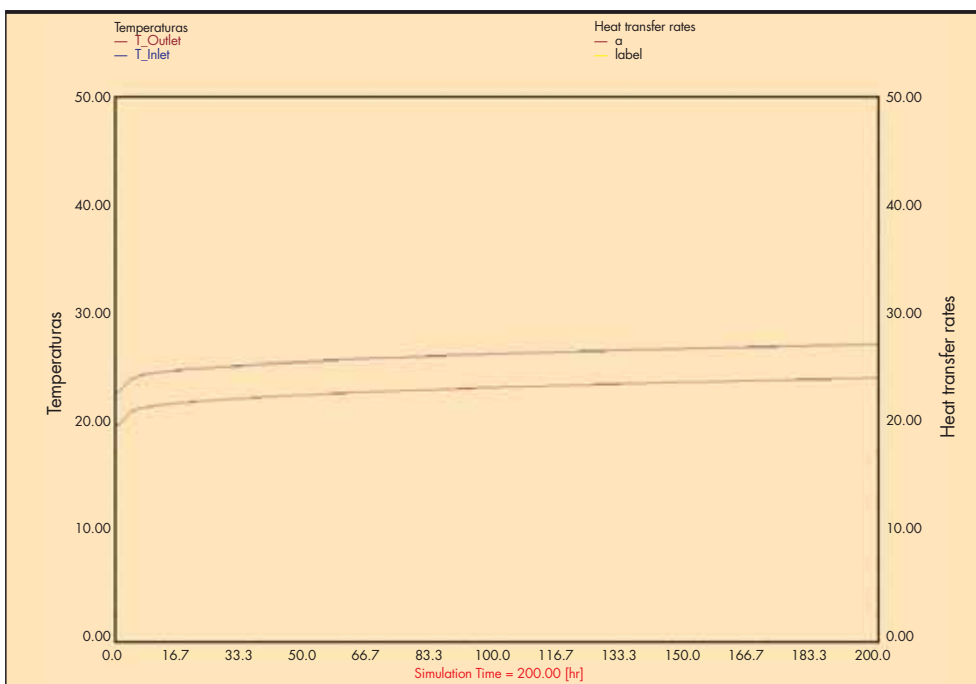


FIGURA 18. Evolución de la temperatura $P = 10 \text{ W/m}^2$.

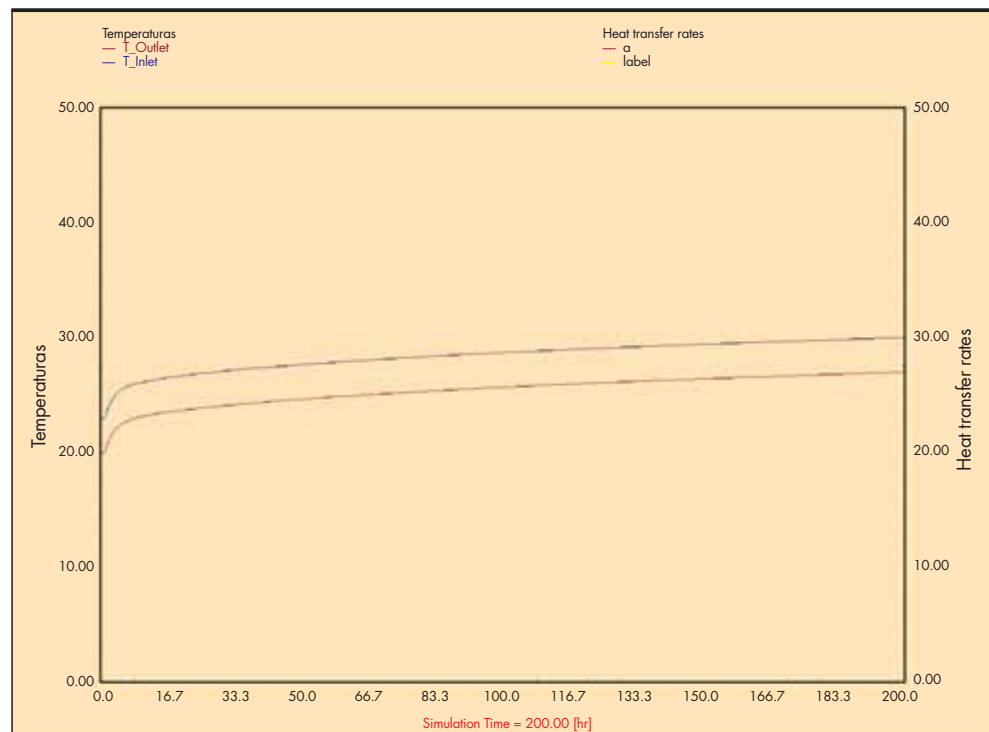


FIGURA 19. Evolución de la temperatura $P = 15 \text{ W/m}$.

lla, definida como la potencia total del sistema (constante) menos la potencia de los ramales, se representa en la Figura 17.

3.2.2. Capacidad térmica de la pantalla

Una vez validado el modelo, se realizaron tres simulaciones para diferentes niveles de potencia.

Las simulaciones se llevaron a cabo inyectando un ratio de potencia por metro lineal de colector de 10 W/m , 15 W/m y 20 W/m , durante un periodo de 200 horas. Las evoluciones de las temperaturas de entrada y salida para los ratios de potencia inyectada mencionados se representan en las Figuras 18, 19 y 20.

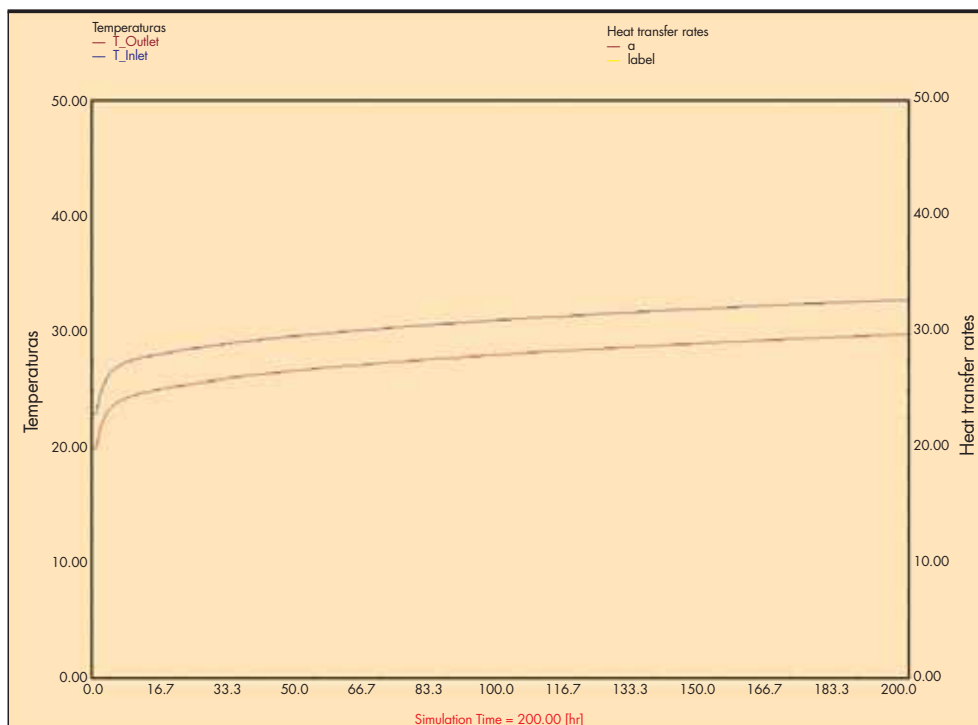


FIGURA 20. Evolución de la temperatura $P = 20 \text{ W/m}$.

4. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos en los ensayos dependen directamente entre otros parámetros, tanto de la conductividad del terreno como de la temperatura no alterada de este. El ajuste de los datos obtenidos en la presente serie de ensayos muestra cierta equivalencia en el funcionamiento de los pilotes a los sondeos usuales en geotermia. En todo caso, en un diseño a escala real de una obra pilotada mediante tecnología de pilotes termoactivos, es preciso la realización de un TRT para poder obtener información a partir de la cual ajustar los modelos térmicos de la cimentación termoactiva. Además hay que tener en cuenta la afectación térmica producida por los pilotes circundantes para evaluar la capacidad de absorción térmica de la estructura a largo plazo.

En cuanto a las pantallas continuas termoactivas, se ha desarrollado un modelo de transferencia de calor específico. Como se ha podido comprobar la aproximación del modelo a la realidad es muy buena produciéndose errores despreciables y validándose por lo tanto el modelo.

Estos trabajos constituyen una **fase preliminar** de un proyecto de investigación y desarrollo de estudios experimentales de las estructuras de hormigón armado de cimentaciones especiales, "pilotes" y "pantallas", utilizadas como intercambiador geotérmico de muy baja entalpía, para la obtención de energía para climatización de edificios a partir del subsuelo.

4.1. PILOTE TERMOACTIVO HORMIGONADO "IN SITU"

Se observa en el ensayo de inyección realizado, Figura 8, la evolución de las temperaturas de entrada y salida en el pilote. A partir de dicha evolución, se representa, Figura 9, la evolución de la temperatura media entre la temperatura de entrada y salida frente al LN (t). Se observa que la tendencia de la curva representada es la de una recta, en vista de la evolución de dicha curva, se puede modelizar el comportamiento térmico del pilote conforme al modelo de línea infinita a partir del cálculo de una longitud equivalente (H) de longitud de tubería enterrada. Esto permite concluir que el pilote es capaz de absorber la potencia de 62,13 W/m de una manera satisfactoria a lo largo de un pulso sostenido de inyección de calor de más de dos días, obteniéndose unas temperaturas de trabajo en un rango inferior a 30°C, muy satisfactorios para el rendimiento de un sistema basado en bombas de calor.

Con la validación del modelo de línea infinita para pilotes termoactivos in situ se facilita en cierta medida el diseño de instalaciones de bombas de calor acoplada a pilotes termoactivos hormigonado "in situ" puesto que el modelo de transferencia de calor es el mismo que el de intercambiadores verticales clásicos y por lo tanto a partir de la Rb y de la longitud equivalente (H) obtenida se puede estar en disposición de diseñar proyectos reales de pilotes termoactivos a partir de programas comerciales.

4.2. PILOTE TERMOACTIVO PREFABRICADO HINCADO

En el ensayo de inyección, Figura 10, la pendiente de la curva de la temperatura media de entrada y salida se va aproximando a una horizontal, estabilizándose, lo que demuestra que el pilote es capaz de absorber los 60 W/m inyectados durante el tiempo que duró el ensayo.

En ensayo de extracción, Figura 11, tampoco se observa saturación térmica del terreno para una potencia de 30 W/m durante el ensayo, aunque la pendiente de la curva tarda más tiempo en estabilizarse.

Los ensayos se han realizado considerando que en la tipología de pilotes prefabricados, como tienen poca profundidad efectiva, unos 12 m., el intercambio de calor se ve condicionado por la evolución de la temperatura ambiente. La temperatura

del terreno es estable a profundidades mayores de 5 metros, en los primeros metros la evolución de la temperatura del terreno queda amortiguada y desfasada respecto a la ambiente.

Hay que tener en cuenta que los valores de los ensayos dependen directamente la conductividad del suelo, en esta ubicación bastante elevada, por lo que no son extrapolables los resultados a otro tipo de terrenos.

Para poder desarrollar el diseño de un proyecto de pilotes termoactivos prefabricados se debería analizar los resultados obtenidos y desarrollar un modelo que permitiera simular el comportamiento de dichos pilotes.

4.3. PANTALLA CONTINUA TERMOACTIVA

La evolución de las temperaturas obtenidas a la entrada y salida de la pantalla termoactiva, Figuras 18, 19 y 20, depende directamente de las características térmicas del terreno donde se ha ejecutado la pantalla.

Debido a la tipología del intercambiador geotérmico donde el colector geotérmico se ha dispuesto dentro de la pantalla en la parte más cercana al terreno, no se ha hallado ningún software comercial que pueda modelizar esta configuración de intercambiador geotérmico. Por lo tanto se ha desarrollado un modelo de transferencia de calor específico para este caso. Como se ha podido comprobar la aproximación del modelo a la realidad es muy buena produciéndose errores despreciables y validándose por lo tanto el modelo.

A partir del modelo desarrollado y realizando una caracterización térmica del terreno en cada proyecto se puede realizar un diseño real de un sistema de bomba de calor geotérmica.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen la colaboración de EADS CASA, CAVEGA, AMR Refractarios Hernani S.A., Ayuntamiento de San Sebastián, Federación Guipuzcoana de Deporte Adaptado, Ente Vasco de la Energía y TELURGYA, UTE Ferrovial-Moyua, y del personal de ENERGESIS, RODIO y KRONSA.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AUSTIN, W.A. (1998).: "Development of an In-Situ System for Measuring Ground Thermal Properties". Master's thesis. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma. 164 pp.
- BRANDL, H. (2006).: "Energy foundations and other thermoactive ground structures". Geotechnique, Volume 56, Number 2, pp. 81-122.
- KAVANAUGH, S. and K. RAFFERTY (1997). "Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings". ASHRAE.
- KLEIN et al. (2006) "TRNSYS A Transient System Simulation Program, User's Manual, Version 16". Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison (2006).
- PAHUD, D., FROMENTIN, A., HADORN, J.C., (1996). "The Duct Ground Heat Storage Model (DST) for TRNSYS Used for the Simulation of Heat Exchanger Piles". DGC-LASEN, Lausanne.
- URCHUEGUÍA, J.F. et al. (2008).: "Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast", Energy, Conversion and Management, doi:10.1016/j.enconman.2008.03.001.
- WITTE, H.J.L., et al (2002).: "In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective" ASHRAE Transactions, Vol. 108, N° 1.