

Comportamiento del micropilote termoactivo como intercambiador geotérmico de baja entalpía en distintas épocas del año



Performance of thermoactive micropile as low enthalpy geothermal heat exchanger in different seasons

Manuel Plaza-García¹, Cristina de-la-Macorra-García², Teresa Magraner-Benedicto³

¹ PILOSUR GEOTERMIA. Calle Santo Domingo Savio, 18 - 23400 Úbeda (Jaén).

² UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO. Campus de Villanueva de la Cañada. Avenida Universidad, 1 - 28691 Villanueva de la Cañada (Madrid).
Tfno: +34 918 10 92 00

³ UNED. Calle de Juan del Rosal, 14 - 28040 Madrid. Tfno: + 34 913 98 60 00

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8048> | Recibido: 03/05/2016 • Evaluado: 04/05/2016 • Aceptado: 25/7/2016

ABSTRACT

- The aim of this article is to show the results obtained from the use of a deep foundation micropile as a shallow geothermal exchanger, so that the micropile has a double functionality: on the one hand to support and transmit the building load to deeper stratus and, on the other hand, to exchange the soil temperature for heating the building through a ground source heat pump.

In order to typify how the micropile performance as a geothermal exchanger is, we carried out several thermal response tests (TRT) in a micropile we made with this research purpose, that implements a reinforcing threaded steel bar designed for geothermal use. The micropile is located in a warehouse in the industrial area "La Planeta", in Mancha Real (Jaén).

This work has as purpose both to get to know the capacity of this micropile to exchange the ground heat and to typify its performance in a shallow geothermal heating system. To reach the first goal, micropile thermal resistance (R_b) is been calculated with the experimental data obtained from the thermal response tests. Meanwhile, for achieving the second objective, we made a range of heat insertion trials simulating the ground source heat pump performance in a building. This way, we determined how the soil temperature influences the heat exchange and the specific heat extraction power (W/m) we can get without thermally overloading the foundation. This value indicates the percentage of the building heating and cooling demand that can be covered by this geothermal system.

- Keywords:** geothermal energy, energy efficiency, thermoactive foundation, self drilling micropile, geothermal heat pump.

RESUMEN

Este artículo tiene por objeto el mostrar los resultados obtenidos en el aprovechamiento de una cimentación profunda mediante micropilotes como intercambiador geotérmico de baja entalpía teniendo dicha cimentación ahora una doble funcionalidad, la de elemento transmisor de cargas del edificio a estratos más profundos y de mayor capacidad portante y la de elemento transmisor de calor con el terreno donde se consigue la climatización del edificio apoyado con una bomba de calor geotérmica.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento del micropilote como intercambiador geotérmico, se realizan varios ensayos de test de respuesta térmica (T.R.T) en un mismo micropilote, ejecutado con esta finalidad investigadora, el cual implementa un tubo es-

tructural específico para aplicaciones geotérmicas. El micropilote se ubica en una nave industrial en el Polígono Industrial "La Planeta", Mancha Real (Jaén).

El fin de este trabajo es, por un lado, determinar la capacidad de transmisión de calor del micropilote descrito y, por otro, caracterizar su comportamiento dentro de un sistema de climatización geotérmica. Para lograr el primer objetivo se calcula la resistencia térmica del micropilote (R_b) a partir de los datos experimentales obtenidos en los test de respuesta térmica, mientras que para conseguir el segundo, se realizan una serie de ensayos de inyección de calor en el micropilote simulando el comportamiento de una bomba de calor en un edificio, determinando la influencia de la temperatura del terreno en el intercambio de calor y el ratio de potencia específica de extracción térmica (W/m) que se puede obtener sin saturar térmicamente la estructura. Este valor indica el tanto por ciento de la demanda total de calefacción y refrigeración del edificio que se puede cubrir con este sistema.

Palabras clave: energía geotérmica, eficiencia energética, cimentación termoactiva, micropilote autoperforante, bomba de calor geotérmica.

1. INTRODUCCIÓN

La alta eficiencia energética que presentan los sistemas geotérmicos de baja entalpía en relación a la climatización de edificios es actualmente bien conocida, mediante bombas de calor agua-agua geotérmicas con términos de eficiencia de dichos equipos de C.O.P. (*coefficient of performance*) y E.E.R. (*energy efficiency ratio*) entorno a 5, lo que supone un ahorro de aproximadamente el 60% de la energía primaria utilizada comparado con sistemas convencionales (ACLUXEGA, 2013).

Pero también es bien conocida la problemática que tienen estos sistemas, en términos económicos, por la necesidad de realizar en el terreno una serie de intercambiadores verticales u horizontales que suponen una mayor inversión inicial por parte del promotor.

Los precios actuales de mercado de bombas de calor geotérmicas comparadas con bombas de calor convencional son prácticamente similares a iguales potencias, por lo que si comparamos la climatización de un mismo edificio con un sistema geotérmico o con un sistema de bomba de calor convencional vemos que el secundario (distribución del calor) es similar en ambos casos, por lo tanto de igual coste, y la única y gran diferencia radicaría pues en la necesidad de realizar, en el sistema geotérmico, los intercambiadores de calor verticales u horizontales.

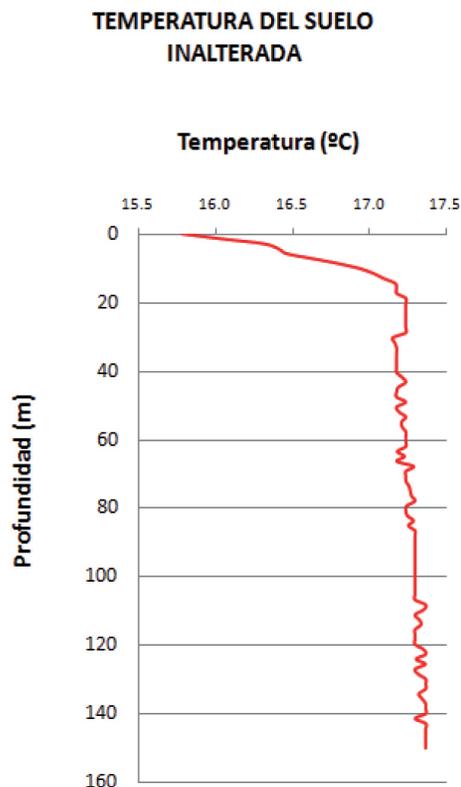


Fig. 1: Ensayo Test de Respuesta Térmica (TRT). Temperatura del suelo inalterada. (Fuente: Elaboración propia)

Esto último implica unos periodos de amortización contrastados de entorno a 8 o 10 años (ACLUXEGA, 2013), dependiendo del caso, que si bien resulta bastante interesante, teniendo en cuenta el ahorro económico que se consigue año tras año después de lograr la amortización, en la actual coyuntura económica supone una barrera a la hora de tomar la decisión siempre penalizada en los sistemas geotérmicos por el elevado desembolso inicial requerido.

Es aquí donde entran en acción las cimentaciones termoactivas. En el caso de edificaciones de nueva construcción que requieran la ejecución de pilotes, micropilotes o muros pantalla y de

edificaciones ya existentes que requieran un recalde de su cimentación mediante micropilotes, surge la oportunidad de aprovechar la perforación o excavación que se necesita realizar para utilizar el mismo elemento estructural como elemento de intercambio geotérmico con un ínfimo sobre coste. Se supera pues el inconveniente económico comentado en el párrafo anterior.

El tubo estructural seleccionado para este ensayo es el fabricado por Ischebeck llamado TITAN 73/53 de diámetro exterior 73 mm y diámetro interior 53 mm, muy habitual en cimentación nueva, recalce de cimentación e incluso muros pantalla de contención. Dentro de la serie TITAN 73 se encuentran el 73/53, 73/56, 73/45 y 73/35 donde solo pueden ser utilizados para aplicaciones geotérmicas, el 73/53 y 73/56 debido a que hace falta tener un espacio mínimo entre el interior del armado del micropilote (53 o 56 mm) y el diámetro exterior del tubo PEAD, polietileno de alta densidad, (32 o 40 mm) de 10 mm para poder circular el fluido caloportador de forma óptima, por lo que solo cumple esta geometría el tubo de PEAD diámetro 32 mm de los dos diámetros comerciales que hay, 32 y 40mm.

2. MICROPILOTE BARRA ISCHEBECK TITAN 73/53. USO GEOTÉRMICO

Como se observa en la Figura 1 obtenida a partir de un test de respuesta térmica (TRT) en un sondeo geotérmico vertical cerrado Ø140 mm simple-U de 150 m de profundidad ejecutado en la misma nave industrial, a una profundidad de -20 m la temperatura del suelo permanece aproximadamente constante, en torno a los 17 °C aumentándose debido al gradiente geotérmico. Este hecho permite el aprovechamiento energético de la geotermia, bien mediante un ciclo de agua directo o bien mediante un segundo ciclo y una bomba de calor para una temperatura de servicio de aproximadamente 35 °C para su uso en suelo radiante (rendimiento óptimo de la bomba de calor). Comentar al respecto que el micropilote geotérmico estudiado tiene una profundidad de 15 metros y que por lo tanto el perfil de temperaturas de 0 a 15 metros se verá afectado por las condiciones externas y por el funcionamiento térmico del micropilote.

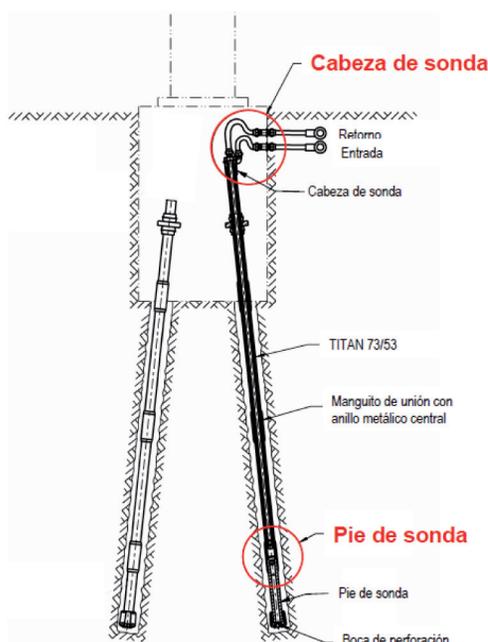


Fig. 2: Esquema micropilote geotérmico (Fuente: Ischebeck, 2011). En la instalación de estudio solo se cuenta con un micropilote geotérmico

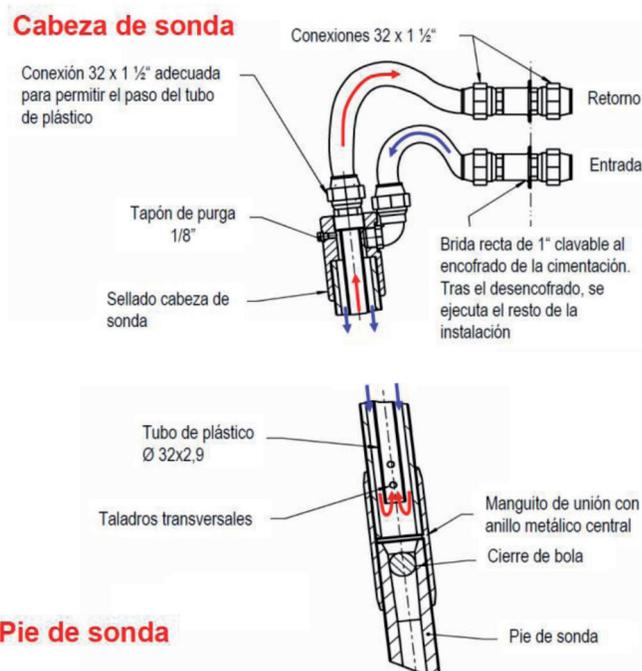


Fig. 3: Cabeza y pie de sonda (Fuente: Ischebeck, 2011)

El intercambiador geotérmico instalado en el micropilote es de la tipología coaxial a diferencia de los sondeos geotérmicos convencionales que disponen de sondas simple/doble U.

Tras el montaje de todos los elementos necesarios para la transmisión de las cargas (placas, tuercas, etc.) se coloca un tubo de polietileno Ø 32 x 2,9 mm en el interior del tubo metálico estructural como se observa en las Figuras 2 y 3, siendo el tubo metálico estructural la impulsión y el tubo de polietileno el retorno.

El tubo de polietileno tiene que quedar acoplado en la conexión superior, como se observa en la Figura 3, y debe de quedar firmemente sellado, después se rosca la pieza superior de la conexión. Antes de poner la sonda en funcionamiento debe realizarse una prueba de presión que garantice la no existencia de pequeñas fugas y por lo tanto la total estanqueidad.

3. EJECUCIÓN MICROPILOTE ISCHEBECK TITAN TERMOACTIVO

Los micropilotes autoperforantes Ischebeck TITAN están constituidos de una barra – tubo roscado por laminación en frío como sección de acero portante y un cuerpo de cemento perimetral, que transmite las cargas de tracción y/o compresión principalmente por rozamiento desde dicha barra a través del cuerpo de inyección al suelo.

Estos micropilotes se denominan también micropilotes inyectados o micropilotes de inyección. Se componen de un tubo de acero roscado, empalmado mediante manguitos roscados externos con tope y juntas de estanqueidad centrales y provistos de una boca de perforación de un solo uso – pérdida: autoperforación.

El barrido de la perforación se efectúa con lechada de cemento que, a la vez, estabiliza el anular de la perforación, satura el terreno de cemento y finalmente, actúa como inyección propiamente dicha, esto es, autoinyección simultánea a la perforación. Operativamente, su principal ventaja es la rapidez en la ejecución y las grandes producciones alcanzadas, puesto que se eliminan las maniobras y el coste correspondiente de retirada del varillaje de perforación y/o entubados, la colocación de la armadura y la inyección y, el coste en baterías de perforación y fungibles.

La diferencia con respecto del micropilote convencional radica pues en que el interior del tubo roscado es lavado quedando totalmente libre de lechada con ayuda del cierre de bola existente en el pie de sonda como puede observarse en la Figura 3. Después de esto ya se puede introducir el tubo de plástico 32 x 2,9 mm utilizado para la circulación del fluido caloportador.

En la Figura 4 puede observarse el micropilote termoactivo ya terminado que se va a utilizar para la ejecución de los distintos Test de Respuesta Térmica (T.R.T). También se visualiza a la perfección el cabezal desde donde parten la impulsión y el retorno del fluido caloportador a la bomba de calor.

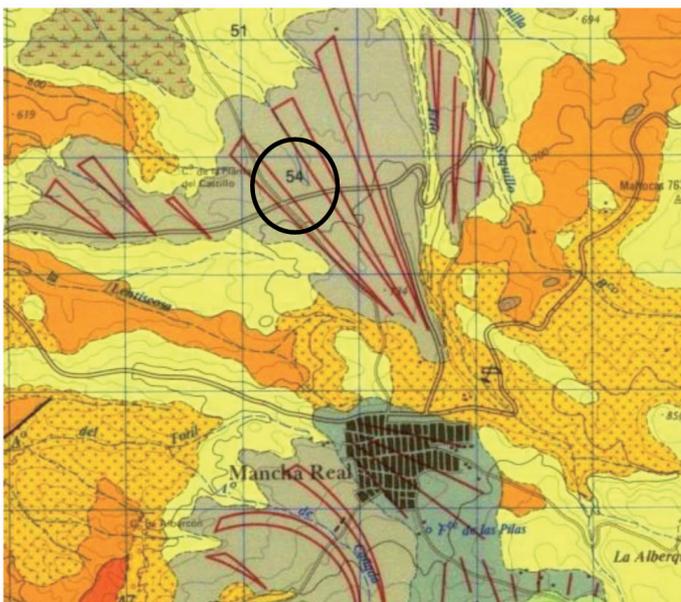


Fig. 4: Cabezal micropilote termoactivo (Fuente: elaboración propia)

4. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

Anexo al micropilote termoactivo ejecutado se realiza un sondeo a 17,7 metros de profundidad con la finalidad de conocer las características geológicas del terreno atravesado. La zona objeto de estudio es una nave industrial situada en la vía de servicio de la carretera A316, en el Polígono Industrial "La Planeta", Mancha Real (Jaén). Las coordenadas UTM (ETRS 89) son X: 443.960 m e Y: 4.184.109 m.

En la Figura 5 se observa la situación geológica de la zona de estudio (Fuente: IGME) donde aparece material cuaternario de poca potencia en superficie seguido de margas de edad terciaria



PROFUN. (m)	CORTE GEOLÓGICO	DESCRIPCION DEL TERRENO
0		0.6m SOLERA (10cm) + MATERIAL ANTRÓPICO.
2		MARGA ARCILLOSA DE BAJA PLASTICIDAD Y COLOR BEIGE CLARO. APARECEN CALICHES DE ESCALA MILIMÉTRICA MAS ABUNDANTES HACIA TECHO.
4		
6		5.60m GRAVA DE CANTO RODADO CON FRACCIONES ARENOSAS Y FINAS.
8		7.60m MARGA ARCILLOSA DE DE PLASTICIDAD MEDIA Y COLOR BEIGE.
10		9.07m GRAVA DE CANTO RODADO CON FRACCIONES ARENOSAS Y FINAS.
12		11.9m MARGA ARCILLOSA DE ALTA PLASTICIDAD Y COLOR BEIGE.
14		APARECEN INTERCALADOS PEQUEÑOS NIVELES DE CRISTALES DE YESOS.
16		
18		17.7m - FINAL DEL SONDEO

Fig. 5: Mapa Geológico (Fuente: IGME) y perfil litoestratigráfico (Fuente: Estudio Geotécnico GEOXAUEN)

a mayor profundidad. También se indica el perfil litoestratigráfico obtenido. Recalcar que no se ha detectado la presencia de agua.

5. ENSAYOS TÉRMICOS

La evaluación del comportamiento térmico del micropilote se ha efectuado con un equipo de test de respuesta térmica del terreno desarrollado por el Grupo PAIDI TEP250-INGEMER de la Universidad de Jaén. Este equipo está formado por un circuito hidráulico alimentado por un generador térmico de efecto Joule que se conecta a las tuberías del micropilote termoactivo. Por el circuito circula un fluido caloportador, en este caso agua, que intercambia calor con el terreno.

Para que el intercambio de calor se realice a potencia constante, el equipo de ensayo controla el caudal y la diferencia de temperatura entre las tuberías de entrada y salida al terreno, estando las sondas para la medida de la temperatura del terreno y la temperatura ambiental dentro del equipo. Además, el dispositivo asegura que el flujo circulante por el circuito sea turbulento ya que se asegura que el número de Reynolds (R_e) sea mayor de 2300, garantizando así la máxima transferencia de calor. Dicho equipo puede observarse en la Figura 6.



Fig. 6: Equipo TRT (Fuente: elaboración propia)

La caracterización térmica del micropilote termoactivo se ha realizado mediante dos pruebas. La primera de ellas ha consistido en un ensayo de test de respuesta térmica estándar, siguiendo las directrices fijadas por la *Ground Source Heat Pump Association* para pilotes térmicos de diámetro inferior a 300 mm (GSHPA, 2012). El objetivo de esta prueba ha sido caracterizar la capacidad del micropilote Ischebeck TITAN para la transferencia de calor, evaluando su resistencia térmica (R_b). Los datos del ensayo son los que se muestran en la Tabla 1.

Duración del ensayo	72 horas
Salto de temperatura (°C)	3
Potencia inyectada (W/m)	66,83

Tabla 1: Datos ensayo caracterización R_b del micropilote

En este ensayo se ha obtenido una temperatura del terreno inalterada en el emplazamiento de 12,6 °C y una conductividad

térmica del terreno de 2,01 W/mK. Este valor se encuentra dentro del rango de conductividades esperadas para las características geológicas de la zona (rango de conductividades de las margas según norma UNE 100715-1:2014, 1,1 – 2,9 W/mK).

El valor de la resistencia térmica del micropilote se ha determinado a partir de los valores del ensayo empleando el modelo de la línea infinita. Este modelo se basa en la aproximación de que el sistema de intercambio es una fuente lineal infinita, considerando el suelo como un medio homogéneo a una temperatura inicial constante (Ingersoll and Plass, 1948).

El valor de la resistencia térmica depende de la difusividad térmica del terreno que viene determinada por su conductividad y su capacidad térmica calorífica. El valor de la conductividad térmica se ha obtenido en el ensayo de respuesta térmica mientras que el valor de la capacidad térmica calorífica volumétrica considerado inicialmente es de 2 MJ/m³ K (valor para margas según norma UNE 100715-1:2014). Siguiendo un proceso iterativo con las variables de difusividad térmica y resistencia térmica del sondeo se obtiene un valor para este último parámetro de 0,08K/(W/m), con un error del 10%, un valor adecuado pero alejado del valor comercial especificado por Ischebeck (0,05 K/(W/m)).

Para corroborar los resultados del valor de R_b obtenido en el ensayo, se ha realizado un análisis teórico de este parámetro, partiendo de la geometría y de los materiales que conforman el micropilote. Su resistencia térmica estará compuesta por la suma de las resistencias térmicas de los elementos que lo forman: el fluido caloportador, la tubería de polietileno, la tubería metálica y el material de inyección. Este cálculo teórico se ha realizado a partir del modelo unidimensional simplificado propuesto por Zeng (Zeng, Diao y Fang, 2003), que considera una única tubería equivalente en el interior del sistema de intercambio térmico. La expresión que caracteriza este modelo es la siguiente:

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_b} \ln\left(\frac{r_b}{r_p \sqrt{N}}\right) + R_p$$

Donde:

k_b es el valor de la conductividad térmica del relleno, en este caso lechada de cemento (1,45 W/mK, valor medio según norma UNE 100715-1:2014).

r_b radio del sistema de intercambio térmico (micropilote), en este caso, 36,5 mm.

r_p radio exterior de la tubería por la que circula el fluido caloportador, en este caso, 26,5 mm.

N nº de tuberías en el interior del micropilote, en este caso, 1.

R_p la resistencia térmica de la pared de la tubería. Se considera el valor de 0,075 K/(W/m) correspondiente a la tubería interior de polietileno (PE SDR 11 1") despreciando la resistencia que puede ofrecer la tubería exterior de acero debido a su elevada conductividad térmica (60 W/mK según norma UNE 100715-1:2014).

El valor de R_b obtenido empleando esta aproximación es de 0,11 K/(W/m), valor más próximo al obtenido experimentalmente que al establecido por Ischebeck.

La segunda de las pruebas ha consistido en la inyección de calor en el terreno siguiendo una curva de inyección similar a la que estaría sometido el micropilote si trabajara como intercambiador de calor de una instalación de bomba de calor geotérmica en una vivienda.

Para ello, a lo largo de un periodo de trece días en marzo, de quince días en julio y de trece días en diciembre (año 2015) se ha inyectado al micropilote una potencia calorífica constante (según ISO 17628:2015) de 67 W/m durante 12 horas al día, dejando descansar a la estructura las 12 horas siguientes, simulando el comportamiento de una instalación de refrigeración en una vivienda (horario de 8:00 de la mañana a 20:00 de la tarde).

El objetivo del ensayo ha sido comprobar la capacidad de la termoestructura y del terreno de recuperarse ante inyecciones de calor prolongadas bajo diferentes condiciones de temperatura del terreno, ya que el micropilote se encuentra emplazado en una zona superficial en la que la temperatura del terreno está influenciada por la temperatura ambiente (Kusuda y Achembach, 1965). En las Figuras 8, 9 y 10 (material suplementario) se muestra la evolución de la temperatura de impulsión y retorno a lo largo de los ensayos. Como se puede observar, con el transcurso de los días, la temperatura del fluido caloportador aumenta ligeramente por el efecto de la saturación térmica del terreno aunque sin sobrepasar los 38 °C en el ensayo de marzo, los 40 °C en el ensayo de julio y sin sobrepasar los 36 °C en el ensayo de diciembre. Se puede fijar una temperatura límite de trabajo de las sondas geotérmicas instaladas en el micropilote de 40 °C (temperatura a partir de la cual el material PEAD puede sufrir una pérdida de sus características y reducir su vida útil), por lo que se puede concluir que el sistema estaría trabajando en condiciones adecuadas.

En cuanto a la regeneración térmica del terreno circundante, en las Figuras 11, 12 y 13 (material suplementario) se muestra la evolución, a lo largo de los días de ensayo de marzo, julio y diciembre, de la temperatura media del terreno imperturbado (Tmed TERRENO), medida después de las 12 horas de parada de la instalación, junto con la evolución de la temperatura ambiente en Mancha Real (Tamb) y la temperatura media del fluido caloportador durante el ensayo (Tmed TRT) que sería la media entre la temperatura de inyección y la de retorno.

Se observa que la temperatura media del terreno aumenta en el ensayo del mes de marzo influenciada no sólo por el calentamiento del mismo a causa del intercambio de calor, sino también por la temperatura ambiente. Esto es debido a que la profundidad del micropilote es tan solo de 15 metros, encontrándose a profundidades en las que la temperatura del terreno aún se ve influenciada por la temperatura ambiente.

En el ensayo del mes de julio, con una temperatura de terreno y una temperatura ambiente más próximas a la temperatura media del fluido caloportador, se puede ver como la temperatura media de terreno no se ve tan influenciada por el intercambio de calor con el sistema.

En el ensayo del mes de diciembre, con una temperatura de terreno y una temperatura ambiente más distantes en este caso a la temperatura media del fluido caloportador, se puede observar que la temperatura media del terreno no se ve influenciada por el intercambio de calor con el sistema y si con la temperatura ambiente debido de nuevo a la escasa profundidad del micropilote.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha caracterizado el comportamiento del micropilote termoactivo Ischebeck TITAN 73/53 en un terreno margoso de temperatura inalterada 12,6 °C en marzo, julio y diciembre de 2015. Se ha obtenido que la respuesta térmica del micropilote ante el intercambio de calor con el terreno Rb es superior a la indicada comercialmente por Ischebeck, sin embargo es un valor muy bueno en comparación con la resistencia térmica obtenida en

otras tipologías de intercambiadores verticales en la misma zona de ensayos.

Respecto a la capacidad de intercambio del micropilote bajo sollicitaciones térmicas continuas, se ha observado que el sistema es capaz de trabajar bajo condiciones de cargas térmicas elevadas sin superar las temperaturas límite de trabajo, aunque debido a su instalación superficial esta capacidad de intercambio se ve influenciada por la temperatura ambiente.

En cuanto a la capacidad de intercambio de calor del micropilote con el terreno ante diferentes condiciones ambientales (y por tanto de temperatura de terreno, ya que ésta está influenciada por la temperatura exterior), se puede concluir que la capacidad para disipar calor del micropilote prácticamente no disminuye trabajando bajo las condiciones más desfavorables (inyección de calor durante el mes de julio).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACLUXEGA, Asociación Clúster da Xeoterminia Galega. Manual de climatización geotérmica. Febrero 2013.
- [2] FENERCOM, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Guía de la Energía Geotérmica. 2008.
- [3] GSHPA, Ground Source Heat Pump Association. Thermal pile design, installation and materials standards. http://www.gshp.org.uk/pdf/GSHPA_Thermal_Pile_Standard.pdf. Issue 1.0. Octubre 2012.
- [4] IGME, Instituto Geológico y Minero de España (www.igme.es).
- [5] Ingersoll L.R., Plass H.J. "Theory of the ground pipe source for the heat pump". ASHVE Trans. 1948, vol. 54, p. 339-348.
- [6] Ischebeck, F. Micropilote geotérmico TITAN 73/53. 2011. <http://www.ischebeck.com/home/service/brochures.htm>
- [7] Kusuda T., Achenbach P.R. "Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States". ASHRAE Transactions. 1965, vol. 171, p. 61-75.
- [8] Zeng, H., Diao, N., Fang, Z. "Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers". International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003, vol 46, p. 4467-4481.
- [9] AENOR. Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera, parte 1: sistemas de circuito cerrado vertical. UNE 100715-1. Madrid: AENOR, 2014.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8048-1.pdf

