

MODELADO TÉRMICO DE UN PILOTE TERMOACTIVO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Trabajo Fin de Máster presentado por:
Borja Badenes Badenes

Máster Universitario en Investigación Matemática
(INVESTMAT)

Dirigida por:
Dr. Pedro J. Fernández de Córdoba Castellá
Dr. Javier F. Urchueguía Schölzel
Dr. Álvaro Enrique Montero Reguera



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

MODELADO TÉRMICO DE UN PILOTE TERMOACTIVO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Trabajo Fin de Máster presentado por:
Borja Badenes Badenes

Máster Universitario en Investigación Matemática
(INVESTMAT)

Dirigida por:
Dr. Pedro J. Fernández de Córdoba Castellá

Dirigida por:
Dr. Javier F. Urchueguía Schölzel

Dirigida por:
Dr. Álvaro Enrique Montero Reguera

Valencia, Septiembre de 2013



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Modelado térmico de un pilote termoactivo y validación experimental

Autor: Borja Badenes Badenes

Director: Dr. Pedro J. Fernández de Córdoba Castellá

Director: Dr. Javier F. Urchueguía Schölzel

Director: Dr. Álvaro Enrique Montero Reguera

A quienes lo han hecho posible

Abstract

The use of Ground Coupled Heat Pumps (GCHP) in foundation structures (for example, in piles, piled walls and slabs) is a way of heating and cooling buildings that respects the environment and also prevents the execution of the drilling, saving civil work costs associated with a Geothermal HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) Systems.

With these thermoactive structure, the energy is transferred from the ground to the fluid carrying pipes inserted into the frame of the structure, and then, to the building (or in the opposite direction, depending on the mode of operation of the heat pump).

To improve knowledge in the field of thermoactive foundation structures, we have developed an experimental facility in order to characterize the behavior of a precast pile subjected to thermomechanical loads. The aim of this study is to model the thermal behavior of a precast pile. The pile is framed within the PITERM research project and is currently driven into the UPV (Universidad Politècnica de València).

Once the thermal behavior of the pile has been designed, thermal resistance will be calculated experimentally, to be able to thermally characterize it. Finally, the experimental results obtained in the thermal tests will be compared with a geothermal pile TRNSYS simulation in order to validate the methodology applied.

Resumen

El uso de bombas de calor acopladas al terreno en estructuras de cimentación (como por ejemplo, en pilotes, pantallas y losas) es una forma de calefacción y refrigeración de edificios respetuosa con el medio ambiente y que además, al evitar la ejecución de las perforaciones, permite ahorrar los costes en obra civil asociados a un sistema de climatización geotérmico.

Con estas estructuras termoactivas es posible la transferencia de energía desde el suelo hasta el fluido que portan las tuberías insertadas en la armadura de la estructura y de allí al edificio (o en el sentido contrario, dependiendo del modo de funcionamiento de la bomba de calor).

Para mejorar el conocimiento en el campo de las estructuras de cimentación termoactivas, se ha desarrollado una instalación experimental con el fin de caracterizar el comportamiento de un pilote prefabricado sujeto a cargas termomecánicas. El objetivo de este trabajo es realizar un modelado del comportamiento térmico de un pilote prefabricado. El pilote a modelar está enmarcado dentro del proyecto de investigación PITERM¹ y se encuentra actualmente hincado en terrenos de la UPV.

Una vez obtenido el modelo del comportamiento térmico del pilote se calculará experimentalmente su resistencia térmica, para poderlo caracterizar térmicamente. Por último, se confrontarán los resultados experimentales obtenidos en los ensayos térmicos con una simulación

¹El proyecto “Caracterización termo-mecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termoactivos” (PITERM), concedido en la convocatoria INNPACTO 2011 y cofinanciado por el MINECO y los Fondos FEDER de la Unión Europea, pretende incorporar al diseño estructural de un pilote termoactivo el comportamiento mecánico debido a las sollicitaciones térmicas a las que se ve sometido.

en TRNSYS del pilote geotérmico, para poder validar la metodología utilizada.

Agradecimientos

En primer lugar querría agradecer todo el tiempo y paciencia de Álvaro Montero dedicados durante el desarrollo de Trabajo Fin de Máster. Gracias por todas tus explicaciones y orientaciones.

También me gustaría agradecer a Javier F. Urchueguía y Pedro Fernández de Córdoba su confianza y oportunidad brindada por permitir seguir formándome en un tema tan apasionante como es la eficiencia energética y el estudio de las estructuras termoactivas.

A Amparo por haber sufrido la falta del tiempo que he tenido que dedicarle a este trabajo.

A Andrea, Arnau, David, Joan, María, Romina y Teresa por todos los buenos ratos en el aula 210.

A todos los compañeros y profesores del Máster Universitario en Investigación Matemática.

Muchas gracias,

Borja Badenes

Índice general

Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
Notación	xvii
1 Introducción	1
1.1 La energía geotérmica	1
1.2 Comportamiento térmico del terreno	4
1.2.1 Conceptos previos	5
1.2.1.1 Capacidad calorífica	5
1.2.1.2 Calor específico	5
1.2.1.3 Capacidad térmica volumétrica	7
1.2.1.4 Conductividad térmica	7
1.2.1.5 Difusividad térmica	9
1.2.1.6 Energía y Potencia	10
1.2.2 Transferencia de calor en el terreno	11
1.2.2.1 Conducción	11
1.2.2.2 Convección	12
1.2.2.3 Calor latente de vaporización	13
1.2.2.4 Radiación	14
1.2.2.5 Dispersión	14
1.3 Estructuras termoactivas	15
1.3.1 Pilotes termoactivos	18

ÍNDICE GENERAL

1.3.1.1	Elementos de un pilote termoactivo	19
1.3.1.1.1	Hormigón	19
1.3.1.1.2	Sondas geotérmicas: intercambiador de calor	20
1.3.1.1.3	Fluido caloportador	23
1.3.1.2	Activación térmica de pilotes	25
1.3.1.2.1	Pilotes hormigonados in situ	25
1.3.1.2.2	Pilotes prefabricados	26
1.4	Motivación del Trabajo de Fin de Master	26
2	Modelado matemático de la transferencia de calor	27
2.1	Transferencia de calor en un pilote termoactivo	27
2.2	Caracterización térmica de un pilote termoactivo	33
3	Validación experimental	37
3.1	Descripción del pilote	37
3.1.1	Instrumentación del pilote	39
3.1.2	El equipo de hinca	41
3.1.3	El proceso de hinca	42
3.1.4	Activación térmica del pilote	46
3.1.4.1	Introducción de la sonda	46
3.1.4.2	Inyección del mortero de alta conduct. térmica	49
3.2	Descripción de la instalación generadora de cargas térmicas	51
3.2.1	Conexión con el pilote termoactivo	53
3.3	Protocolo de ensayos	53
3.4	Ejecución de las pruebas y resultados	57
3.4.1	Cronograma de los ensayos	57
3.4.2	Perfil térmico del pilote	57
3.4.3	Aplicación de las cargas térmicas	60
3.4.3.1	Primera fase: Saltos térmicos de potencia variable	60
3.4.3.2	Segunda fase: Recuperación del terreno	62
3.4.3.3	Tercera fase: Salto térmico a diferente potencia	63
3.5	Interpretación de los resultados	64
3.5.1	Cálculo experimental de la resistencia térmica del pilote	65

3.5.2	Ajuste de parámetros mediante TRNSYS	68
4	Conclusiones	73
4.1	Trabajos futuros	74
	Bibliografía	77

Índice de figuras

1.1	Temperatura del terreno con la profundidad	2
1.2	Vivienda climatizada mediante energía geotérmica	3
1.3	Elementos que componen una instalación geotérmica	4
1.4	Relación de la conductividad térmica con diferentes suelos	8
1.5	Esquema de un edificio con estructura termoactiva	16
1.6	Pilote in situ	17
1.7	Ejemplo de pilotes	18
1.8	Pilote termoactivo	19
1.9	Elementos de un pilote termoactivo	21
1.10	Sección de diferentes tipos de intercambiador	22
2.1	Gráfica de las funciones $G_t(\tau)$ y $\ln(4\tau) - \gamma$ frente a τ	30
2.2	Resistencia térmica global en un pilote termoactivo	33
3.1	Croquis del pilote prefabricado	38
3.2	Pilote en el campo de pruebas	38
3.3	Perfil del terreno e instrumentación en el pilote	40
3.4	Croquis de la instrumentación instalada en el pilote	40
3.5	Equipo de hincado	41
3.6	Proceso de la hincado	42
3.7	Conexión del material de instrumentación	43
3.8	Izado del segundo tramo	44
3.9	Proceso de hincado del segundo tramo	45
3.10	Comprobación de la instrumentación	45

ÍNDICE DE FIGURAS

3.11 Perfil de resistencia a la penetración	47
3.12 Introducción de la sonda en el interior del pilote	48
3.13 Conexionado mediante codos a la tubería horizontal	48
3.14 Mortero durante el proceso de mezclado	50
3.15 Pantalla con el sistema de regulación	53
3.16 Sistema de conexionado del pilote termoactivo con la instalación generadora térmica	54
3.17 Esquema de la instalación de producción térmica	55
3.18 Características del ensayo	56
3.19 Cronograma de los ensayos	58
3.20 Perfil térmico del pilote	59
3.21 Variación de la temperatura con el tiempo	60
3.22 Variación de la potencia de inyección en el pilote	61
3.23 Registro de datos de la instalación térmica durante la Fase I	62
3.24 Perfil térmico del terreno antes de cada uno de los ensayos	63
3.25 Registro de datos de la instalación térmica durante la Fase III	64
3.26 Registro de datos de la instalación térmica durante los dos ensayos	66
3.27 Aproximación de la temperatura media en el pilote a la ecuación de una recta	67
3.28 Simulación mediante TRSYS	69
3.29 Salida de la simulación mediante TRNSYS	71
3.30 Detalle salida de la simulación mediante TRNSYS	72
3.31 Detalle salida de la simulación mediante TRNSYS	72
3.32 Detalle salida de la simulación mediante TRNSYS	72

Índice de tablas

1.1	Conductividad térmica de algunos materiales	20
1.2	Propiedades físicas de los fluidos empleados	25
3.1	Resumen de instrumentación del pilote termoactivo	39
3.2	Características del mortero FCK 5025	50

Notación

Letras Latinas

\dot{m}	Caudal másico	kg/s
c	Capacidad volumétrica	$Jm^{-3}K^{-1}$
E_i	Integral exponencial	
L	Longitud de intercambio	m
Q	Flujo de calor	W
q	Flujo de calor por unidad de longitud	W/m
Q_z	Flujo de calor por unidad de longitud	W/m
R_b	Resistencia térmica	mK/W
r_b	Radio del pozo	m
R_h	Radio hidráulico	m
T	Temperatura del suelo	K

T_0	Temperatura del suelo sin alterar	K
T_f	Temperatura media del fluido caloportador	K
T_{in}	Temperatura de entrada	K
T_{out}	Temperatura de salida	K

Letras Griegas

α	Difusividad térmica ($= \lambda/c$)	m^2/s
γ	Constante de Euler	
λ	Conductividad térmica	W/(mK)

Abreviaturas

ACS	Agua Caliente Sanitaria
BCG	Bomba de Calor Geotérmica
COP	Coficiente de rendimiento

Back off, man. I'm a scientist.

Bill Murray. Ghostbuster

CAPÍTULO

1

Introducción

1.1 La energía geotérmica

[BMdCU13]

La energía geotérmica (de baja temperatura) es la energía solar almacenada en las capas superficiales de la tierra. Esto se traduce en que a partir de una profundidad de 15 metros, el terreno está a temperatura constante durante todo el año, lo que lo hace un foco de intercambio de calor más conveniente y estable que el aire, que es el usado por los sistemas tradicionales. Se puede captar y utilizar esta energía almacenada en cualquier punto de la superficie del planeta y usarla para la climatización de casas individuales o edificios por mediación de bombas de calor geotérmicas.

Los sistemas habituales de climatización de edificios usan unidades de refrigeración/calefacción, o bombas de calor, situadas en techos o terrazas que funcionan mediante la cesión o extracción de calor del propio aire ambiente. En cambio, en los sistemas geotérmicos, se extrae o cede calor al suelo que rodea el edificio mediante un circuito de agua enterrado. Una gran ventaja de estos sistemas es el ahorro eléctrico que presentan. Si imaginamos que en verano queremos refrigerar una habitación a 24 grados, se pueden presentar dos escenarios energéticamente muy

1. INTRODUCCIÓN

diferentes: el sistema tradicional, que elimina el calor excedente al aire, el cual se encuentra, por ejemplo, a 40 grados y el caso geotérmico, en el que el calor excedente se trasmite al subsuelo que está a unos 20 grados. El diferente salto térmico que la bomba de calor debe vencer en ambos casos es la razón última por la que el sistema geotérmico requiere menor aporte eléctrico para climatizar un edificio. Dicho ahorro en la tarifa eléctrica es del orden del 40 %.

La energía geotérmica de muy baja temperatura basa sus aplicaciones en la capacidad que el subsuelo posee de acumular calor, y de mantener una temperatura sensiblemente constante a determinada profundidad, a lo largo de todo el año (ver Figura 1.1).

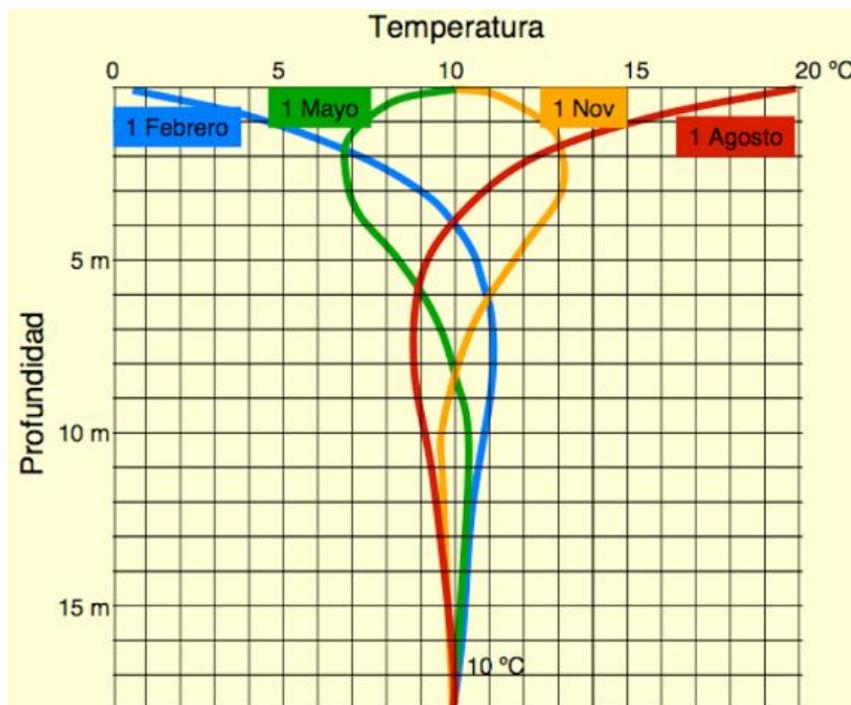


Figura 1.1: Temperatura del terreno con la profundidad

Las necesidades energéticas en los hogares se centran en la calefacción, refrigeración y el agua caliente sanitaria, con lo que podría plantearse una primera idea de aprovechamiento de este recurso energético: utilizar la temperatura del subsuelo como foco térmico para climatizar las viviendas y el agua de uso doméstico diario (ver Figura 1.2).

Es evidente que el comportamiento de los terrenos en cuanto a la transmisión del calor a través de ellos y a su capacidad de almacenarlo, condicionarán en gran medida el rendimiento del aprovechamiento de este tipo de energía. La forma de aumentar la temperatura del fluido de intercambio de calor deberá proceder de una fuente de energía externa; para ello, se utiliza elemento con un funcionamiento sencillo y con unos rendimientos muy notables, denominado bomba de calor. Al conjunto de la instalación se le llamará instalación de climatización geotérmica.

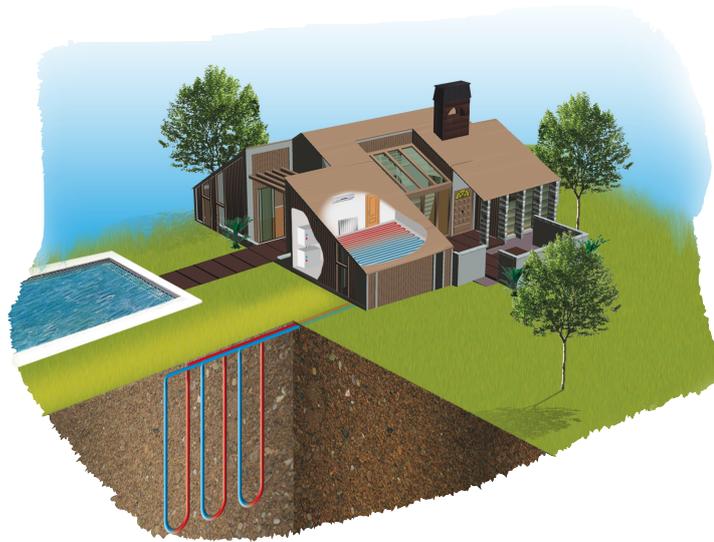


Figura 1.2: Vivienda climatizada mediante energía geotérmica

Una instalación de climatización geotérmica se compone de una bomba de calor que tiene en su interior un intercambiador de calor que por un lado está conectado al circuito de climatización o ACS (el circuito interior de la vivienda) y por el otro está conectado a un intercambiador enterrado (en el exterior de la vivienda). Una válvula de cuatro vías dirige la circulación del fluido refrigerante en un sentido o en otro, en función del régimen de funcionamiento; en calefacción, el intercambiador interior funciona como condensador y el exterior como evaporador, invirtiéndose los papeles en régimen de refrigeración (ver Figura 1.3).

1. INTRODUCCIÓN

El intercambiador de calor enterrado está constituido por tuberías plásticas de alta resistencia y gran duración (principalmente polietileno de alta densidad). Por estas tuberías circula agua o agua con glicol (agua con anticongelante) intercambiando calor con el terreno. La capacidad de intercambio de calor depende de la composición del terreno, de la longitud del intercambiador, de la utilización y el tipo de material de relleno que se coloque entre las tuberías del intercambiador y el suelo, así como de la separación entre las tuberías. Según la carga térmica a disipar o absorber se pueden conjugar todas estas variables para llegar a un diseño óptimo para cada aplicación.



Figura 1.3: Elementos que componen una instalación geotérmica

Una vez unidos todos los pozos al colector, éste se lleva hasta la sala de máquina, donde se unirá a la bomba de calor junto a los demás elementos auxiliares de la instalación (bomba de circulación del primario, vaso de expansión, filtro, etc.).

1.2 Comportamiento térmico del terreno

A continuación se describen los conceptos más importantes en relación al comportamiento térmico del terreno:

1.2.1 Conceptos previos

1.2.1.1 Capacidad calorífica

La capacidad calorífica es la razón de la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo en un proceso cualquiera por su cambio de temperatura correspondiente. En una forma menos formal es la energía necesaria para aumentar 1 K su temperatura. Indica la mayor o menor dificultad que presenta dicho cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Puede interpretarse como una medida de inercia térmica. Es una propiedad extensiva, ya que su magnitud depende de la cantidad de material en el objeto y, además, depende de la temperatura y de la presión.

Para medir la capacidad calorífica bajo unas determinadas condiciones es necesario comparar el calor absorbido por una sustancia (o un sistema) con el incremento de temperatura resultante. La capacidad calorífica viene definida matemáticamente por:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{Q}{\Delta T}$$

donde:

C es la capacidad calorífica, medido en unidades del SI en julios/K (o cal/°C).

Q es el calor absorbido por el sistema.

ΔT la variación de temperatura.

1.2.1.2 Calor específico

Como se ha mencionado en el apartado 1.2.1.1, la capacidad calorífica (C) de un sistema físico depende de la cantidad de sustancia o masa de dicho sistema. A partir de ésta, es posible definir una capacidad calorífica específica o calor específico como la relación entre la capacidad calorífica y la masa del cuerpo:

$$C = c \cdot m$$
$$\frac{Q}{\Delta T} \approx c \cdot m$$

1. INTRODUCCIÓN

donde:

c es el calor específico o capacidad calorífica específica (Julios/Kg·K).

m la masa de sustancia considerada (Kg).

C es la capacidad calorífica.

El calor específico o más formalmente la capacidad calorífica específica de una sustancia es una magnitud física que indica la capacidad de un material para almacenar energía interna en forma de calor.

De manera formal es la energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura una cantidad unitaria de sustancia; usando el Sistema Internacional es la cantidad de julios de energía necesaria para elevar en un 1 K la temperatura de 1 Kg de masa. Se representa por lo general con la letra c .

$$c = \frac{dQ}{dT \cdot m} \left(\frac{\text{Julios}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right)$$

Matemáticamente el calor específico es la razón entre la capacidad calorífica de un objeto y su masa. Se calcula fácilmente a partir del calor específico y porcentaje de cada uno de sus constituyentes:

$$c = \chi_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 + \chi_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 + \chi_3 \cdot \rho_3 \cdot c_3$$

% en volumen	χ_1	χ_2	χ_3
Densidad	ρ_1	ρ_2	ρ_3
Calor específico	c_1	c_2	c_3

Como los componentes minerales e inorgánicos tienen capacidades térmicas similares, el agua es la única variable relevante en el corto plazo. Por el contrario, a largo plazo los procesos de consolidación o contracción del suelo pueden llegar a ser importantes porque los volúmenes cambian. La capacidad térmica global aumenta con el contenido de agua mientras que decrece en caso de congelamiento. (La capacidad calorífica específica del hielo es de 1884J/kg K comparada con la capacidad calorífica del agua de 4186 J/kg K).

1.2.1.3 Capacidad térmica volumétrica

Un parámetro relacionado con el calor específico o capacidad calorífica específica es la capacidad térmica volumétrica, equivalente a la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1 m³ de terreno en un grado Kelvin. Se expresa en J/m³·K. La capacidad volumétrica viene determinada por la capacidad calorífica específica y de la densidad aparente del suelo y representa la media aritmética ponderada de la capacidad térmica de los componentes de un suelo en particular.

$$C_v = \sum \rho_i c_i \chi_i$$

ó

$$C_v = \rho_s \left(c_s + c_w \frac{w}{100} \right)$$

donde:

c_v es la capacidad térmica volumétrica (J/m³·K).

ρ es la densidad de cada uno de los componentes del terreno (Kg/m³).

c es el calor específico de cada uno de los componentes del terreno (J/Kg·K).

ρ es el porcentaje en volumen de cada uno de los componentes.

c_w es el calor específico del agua (J/Kg·K).

c_s es el calor específico de la fase sólida del terreno (J/Kg·K).

ρ_s es la densidad promedio de la fase sólida del terreno (Kg/m³).

1.2.1.4 Conductividad térmica

La conductividad térmica es el flujo de calor transmitido por conducción a través de un cuerpo sometido a un gradiente de temperatura de 1 K/m (1 grado Kelvin por metro). Se expresa en W/m ó W/m·K.

Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto. Matemáticamente se define como:

1. INTRODUCCIÓN

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

donde:

El signo menos (-) indica que el flujo de calor se produce de caliente a frío.

q : flujo de calor por unidad de tiempo o por unidad de área $\left(\frac{W}{m^2} = \frac{Kg \cdot m^2}{s^3 \cdot m^2}\right)$.

λ es la conductividad térmica $\left(\frac{W}{m \cdot K} = \frac{Kg \cdot m^2}{s^3 \cdot m \cdot K}\right)$.

$\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura a través del medio conductor.

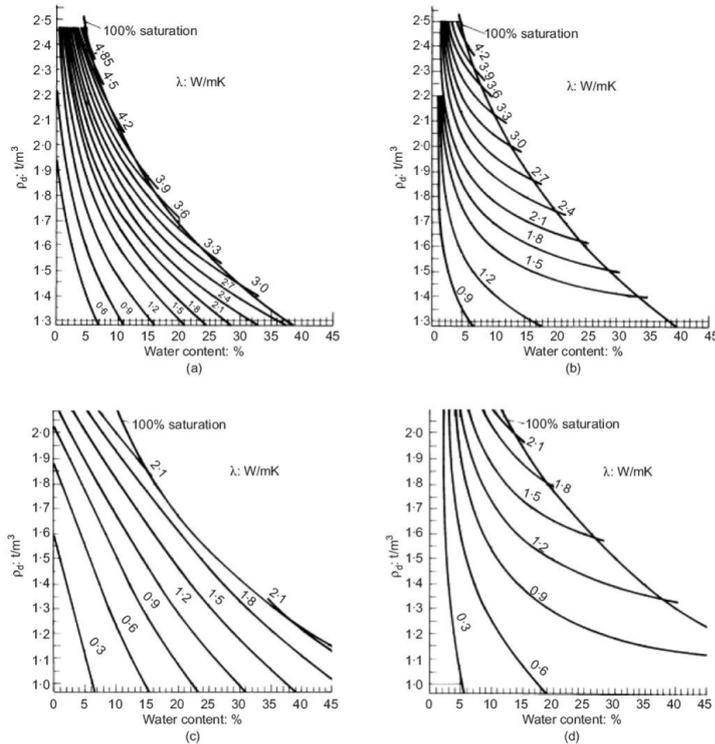


Figura 1.4: Relación de la conductividad térmica con la densidad seca, humedad y textura en suelos helados y no helados: a) Suelo de grano grueso helado b) Suelo de grano grueso no helado c) Suelo de grado fino helado y d) Suelo de grano fino no helado.

La conductividad térmica es, sin lugar a dudas, el parámetro más importante de los que caracterizan el comportamiento térmico de un material. Constituye un parámetro fundamental en el diseño de instalaciones de aprovechamiento geotérmico. En

el diseño preliminar es posible deducir una aproximación del valor de conductividad térmica del terreno a partir de los diagramas que correlacionan densidad, textura y saturación del terreno. Sin embargo, en proyectos importantes es indispensable medir con precisión y fiabilidad la conductividad térmica del suelo mediante ensayos de laboratorio o ensayos in situ.

La conductividad térmica de un material geológico se ve influenciada por el contenido de agua, la densidad y por sus componentes mineralógicos (Figura 1.4). Así, el agua congelada tiene una conductividad térmica de 2,18 W/(mK) mientras que el agua en su estado líquido tiene una conductividad de 0,57 W/(mK). De esta forma se puede observar que la conductividad solo se puede dar de forma aproximada.

1.2.1.5 Difusividad térmica

La conductividad térmica λ , la capacidad calorífica c y la densidad ρ del sólido son parámetros dependientes de la temperatura y se unen en la ecuación básica de conducción de calor:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

donde:

α es la difusividad térmica (m^2/s). La difusividad térmica describe la velocidad de transferencia de calor en el terreno. Este parámetro se usa habitualmente en los modelos de comportamiento térmico y constituye una medida de la mayor o menor facilidad con que un suelo cambiará su temperatura. Matemáticamente equivale a la conductividad térmica dividida por el producto del calor específico y la densidad. Sus unidades en el Sistema Internacional son m^2/s .

λ es la conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$).

ρ es la densidad del suelo (Kg/m^3).

c es el calor específico ($\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K}$).

1. INTRODUCCIÓN

1.2.1.6 Energía y Potencia

Energía y potencia son conceptos íntimamente relacionados pero diferentes. Desde el momento en que la electricidad se consume en la medida que pasa el tiempo, la unidad empleada debe tenerlo en cuenta. La unidad empleada es unidad de energía: el kilovatio-hora (kWh). Por otro lado, independientemente del tiempo, la unidad de potencia, el kilovatio (kW), es la demanda instantánea de electricidad que se consume en cada momento.

Confundir las dos unidades es un error muy común, por lo que se exponen brevemente a continuación ambos conceptos físicos, energía y potencia, enunciando en cada caso las unidades que les corresponden.

Energía es una propiedad de un sistema físico, definida como la capacidad para realizar un trabajo. Según esta definición, la energía no puede ser creada, ni consumida, ni destruida, sin embargo puede ser convertida o transferida en diferentes formas: la energía cinética del movimiento de las moléculas de aire puede ser convertida en energía rotacional por el rotor de una turbina eólica, que a su vez puede ser convertida en energía eléctrica por el generador de la turbina eólica. En cada conversión de energía, parte de la energía proveniente de la fuente es convertida en energía calorífica.

Para definir la producción de las máquinas que generan energía eléctrica a partir de cualquier otro tipo de energía se utiliza una medida de energía denominada kilovatios-hora (kWh) o megavatios-hora (MWh) durante un cierto periodo de tiempo, por ejemplo una hora o un año.

Unidades de energía:

- 1 J (julio) = 1 Ws = 0,2388 cal, y sus múltiplos más habituales: GJ (gigajulio) = 10^9 J, TJ (terajulio) = 10^{12} J, PJ (petajulio) = 10^{15} J.
- 1 (kilovatio-hora) kWh = 3.600.000 Julios
- 1 tep (tonelada equivalente de petróleo) = 7,4 barriles de crudo en energía primaria = 7,8 barriles de consumo final total = 1.270 m³ de gas natural = 2,3 toneladas métricas de carbón.

De entre todas estas unidades, la más común es el kilovatio hora (kWh), energía desarrollada por una potencia de un kilovatio (kW) durante una hora, equivalente

a 3,6 millones de julios. Aunque no es una medida del Sistema Internacional, se usa en lugar del Julio (equivalente a un vatio-segundo (W·s), que resulta ser una unidad demasiado pequeña, lo que obligaría a emplear cifras demasiado grandes. La equivalencia entre ambas unidades viene definida en la siguiente ecuación:

$$1kWh = \frac{1000J}{1s} \cdot 3600s = 3600000J$$

La potencia es transferencia de energía por unidad de tiempo. La potencia puede ser medida en cualquier instante de tiempo, mientras que la energía debe ser medida durante un cierto periodo, p.ej. un segundo, una hora o un año. Que una máquina tenga una potencia nominal de 1000 kW, indica que producirá 1000 kilovatios-hora (kWh) de energía por hora de funcionamiento. La potencia eléctrica suele medirse en vatios (W), kilovatios (kW), megavatios (MW), etc.

1.2.2 Transferencia de calor en el terreno

El suelo es un sistema complejo compuesto por tres fases: la fase sólida es el esqueleto formado por las partículas minerales constituyentes del suelo; la fase líquida consiste generalmente en agua y la fase gaseosa está formada por aire y vapor de agua fundamentalmente.

El calor se puede transportar en el terreno mediante diferentes mecanismos, de los cuales los tres más importantes son conducción, convección y transferencia de calor debido a cambios de fase, fenómeno este último también conocido como calor latente de vaporización. La radiación, aunque es otro mecanismo de transferencia de calor, es muy poco importante, incluso despreciable. Por esta razón numerosos autores lo excluyen de las formulaciones.

1.2.2.1 Conducción

Conducción es la transferencia de calor a través de un medio por interacción entre partículas adyacentes, sin movimiento visible en el medio. El calor pasa directamente de una molécula con un mayor nivel de energía a otra con menor energía. El

1. INTRODUCCIÓN

flujo de calor por unidad de área generado por conducción por unidad de tiempo (q_{cond}) se define matemáticamente según la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{Q}{A} = -\lambda \cdot \nabla T$$

donde:

Q es el volumen de calor.

A es el área atravesada por el flujo de calor.

λ es la conductividad térmica del medio.

$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z$ es el gradiente de temperatura en la dirección de flujo n .

Puede tener lugar entre sólidos, líquidos y gases, aunque es característica de los sólidos, puesto que en gases y líquidos se producirá siempre conducción y convección simultáneamente.

1.2.2.2 Convección

Convección es el modo en que se transfiere la energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluido provocado por las diferencias de densidad del mismo. Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. Las partículas más calientes del fluido y, por tanto, menos densas, ascienden, desplazando a las más frías, que se hunden por gravedad, dado que son más densas. Estas posteriormente, al calentarse, ascienden otra vez arriba. Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

En suelos, se asume que la fase sólida permanece estática mientras la convección afecta únicamente a la fase líquida o vapor.

Se distingue entre el flujo de calor generado por la convección de un fluido y por un vapor. En el caso de un fluido:

$$q_{l,conv} = c_w \rho_w \vec{v}_w (T - T')$$

donde:

c_w es la capacidad calorífica específica del agua del suelo (J/Kg·K).

ρ_w es la densidad del agua (Kg/m³).

\vec{v}_w es el vector velocidad de agua (m/s).

T es la temperatura real (K).

T' es una temperatura de referencia (K).

De forma similar, el flujo de calor generado por la convección de un vapor viene determinado por la siguiente ecuación:

$$q_{v,conv} = c_v \rho_v \vec{v}_v (T - T')$$

donde

c_v es el calor específico del vapor del suelo.

ρ_v es la densidad del agua del suelo.

\vec{v}_v es el vector velocidad del vapor.

T es la temperatura real (K).

T' es una temperatura de referencia (K).

1.2.2.3 Calor latente de vaporización

La transferencia de calor latente que ocurre como resultado de un cambio de fase del agua (vaporización) depende principalmente en la cantidad de vapor transferido en los poros del sólido, aumentando con la disminución del contenido de agua.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos. La magnitud de su contribución al conjunto de la transferencia de calor dependerá de la cantidad de transferencia de vapor existente en el medio y puede llegar a ser importante en condiciones secas. El flujo de calor debido al calor latente de vaporización se define matemáticamente como:

1. INTRODUCCIÓN

$$q_{lat} = L_0 \rho_v \vec{v}_w$$

Donde L_0 es el calor latente de vaporización a la temperatura T' .

1.2.2.4 Radiación

La radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los materiales a temperatura superior al cero absoluto (-273°C) emiten radiación térmica. Los más calientes radian más que los fríos. Cuando una radiación electromagnética choca con un material, sus moléculas se mueven más deprisa, calentando el material.

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. Como ya se ha comentado anteriormente, la radiación es un mecanismo de transferencia de calor muy poco importante en el terreno, incluso despreciable. Por esta razón numerosos autores lo excluyen de las formulaciones.

1.2.2.5 Dispersión

Existe también la presencia del fenómeno de dispersión del calor por el fluido en función del tiempo. Esta dispersión es debida a la distribución de diferentes velocidades de flujo de cada volumen de agua dentro del espacio real de terreno. La variación de calor por unidad de tiempo y volumen debido a la dispersión es:

$$\dot{q}_v = \text{div} \cdot (D_\lambda \cdot \text{grad}T)$$

donde:

$D_\lambda = (\rho c)_f \delta_\lambda |V|$ es el coeficiente de dispersión de calor ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

δ_λ es la dispersividad de calor (m).

c es la capacidad calorífica específica ($\text{J/Kg}\cdot\text{K}$).

ρ es la densidad (Kg/m^3).

V es la velocidad de filtración del agua (m/s).

1.3 Estructuras termoactivas

En los casos en que se considere necesario para garantizar la estabilidad de una edificación u obra pública el uso de elementos estructurales como pilotes, pantallas subterráneas, muros de contención o losas, es posible aprovechar tales cimentaciones como intercambiadores de calor con el terreno. Estos tipos de instalaciones geotérmicas se denominan habitualmente cimientos geotérmicos o estructuras termoactivas.

La *cimentación termoactiva* es una tecnología aplicable a los elementos de las estructuras de hormigón armado de las cimentaciones, “pilotes” y “pantallas”, para la obtención de energía para climatización de edificios a partir del subsuelo. Este tipo de cimentación se basa en el aprovechamiento de las estructuras de cimentación para optimizar las bombas de calor geotérmicas.

En realidad, se trata de convertir la estructura resistente de cimentación en una instalación geotérmica dotándola de intercambiadores, consistentes en redes de tubos de plástico, habitualmente de polietileno de alta densidad, propileno, polibutileno o PVC, a través de los cuales circula agua o agua con anticongelante, produciéndose un intercambio de calor entre este fluido y el terreno atravesando el pilote. El fluido es conducido a una bomba de calor geotérmica generando la energía suficiente para la climatización del edificio.

La utilización de hormigón estructural como elemento intercambiador de calor con el terreno es posible en diversos tipos de cimentaciones: pilotes de hormigón, tanto in situ como prefabricados, pilotes huecos de hormigón, acero o fundición, pantallas de pilotes, muros-pantalla y losas. De todos ellos, los más frecuentes son los pilotes de diversa tipología, in situ, prefabricados o de acero huecos, aunque con el tiempo se comienza a trabajar en el resto de cimentaciones con mayor profusión.

La extracción y utilización de la energía geotérmica del terreno a través de los elementos estructurales de cimentaciones nace en Austria y Suiza alrededor de 1980 y

1. INTRODUCCIÓN

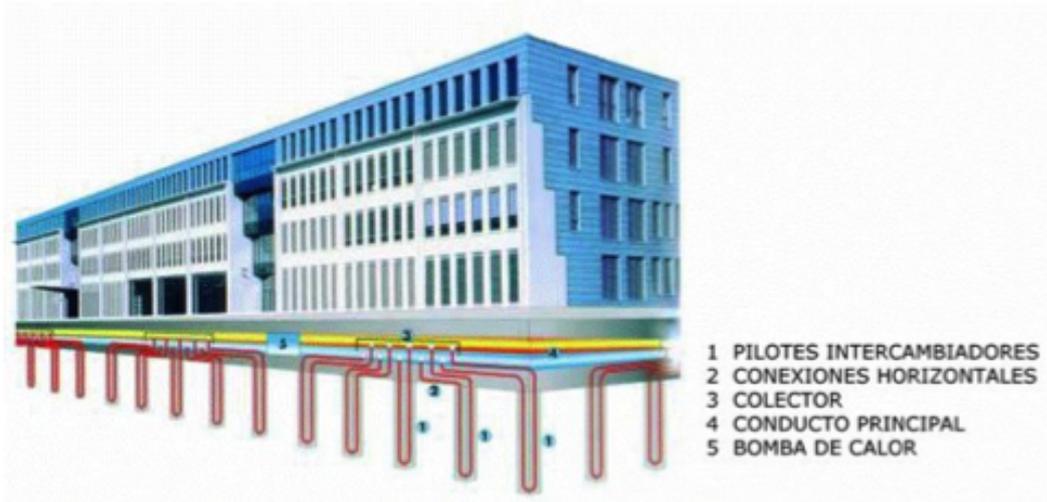


Figura 1.5: Esquema de un edificio con estructura termoactiva

desde entonces han ido aumentando los casos de aplicaciones en zapatas, seguidas posteriormente de pilotes (1984) y muros pantalla (1996).

Esta innovación, basada en las buenas propiedades del hormigón de almacenar y transmitir el calor presenta la ventaja de que las estructuras como zapatas, pantallas y pilotes que de por sí van a cumplir una misión estructural, pueden ser complementadas con la instalación de los intercambiadores de calor descritos anteriormente y actuar como soporte de una instalación de extracción de energía geotérmica del terreno que satisfaga las necesidades del edificio. En Austria existen cerca de 300 edificios equipados con pilotes, pantallas, zapatas geotérmicas.

Como se ha mencionado anteriormente, el hormigón presenta unas buenas propiedades térmicas, incluyendo una conductividad térmica mejor que la del suelo. Para convertir una estructura de hormigón en una instalación geotérmica, únicamente hay que embeber en el hormigón tuberías de polietileno de alta densidad, de 2,0 a 2,3 mm de espesor de pared y 20 a 25 mm de diámetro conformando lazos en forma de U. Por su interior circulará un fluido intercambiador de calor (agua, agua con un anticongelante o una solución salina) que transmitirá el calor del terreno al edificio o viceversa, según las necesidades.

En cada elemento de cimentación pueden alojarse varios pares de tubos independientes, sujetos a la armadura metálica de dicho pilote y que convergen en super-

ficie en un colector común. En el caso de pilotes hormigonados in situ, una vez realizada la excavación, se inserta la armadura del cimiento o pilote sobre la que va sustentada la red de tuberías. A continuación, se rellena el pilote con un material de conductividad térmica apropiada, quedando la red de intercambiadores embebida en el seno del pilote. Una vez que los tubos se encuentran embebidos en el seno del hormigón ya curado, éste les proporciona una magnífica protección, impidiendo que se dañen por agentes externos.



Figura 1.6: Armadura de pilote con el circuito de intercambio de calor, antes y después de su colocación en el interior de un pilote in situ

El tema de cómo afecta la instalación de las sondas geotérmicas a la capacidad portante da lugar a controversias en la literatura. El diseño de cimentaciones termoactivas requiere de una serie de sofisticados cálculos térmicos para determinar la cantidad de energía térmica extraíble en función de parámetros del terreno geotécnicos, térmicos e hidrogeológicos, la geometría del sistema de captadores y las necesidades energéticas de la edificación.

Como una primera estimación, pueden considerarse razonables los siguientes valores, que relacionan potencia explotada con tipología y dimensiones de cimentación:

- En pilotes de diámetro entre 30 y 50 cm: 40-60 W/metro lineal.

1. INTRODUCCIÓN

- En pilotes de diámetro superior a 60 cm: 35 W/m² de área perimetral de contacto.
- Muros pantalla y pantallas de pilotes: 30 W/m² de superficie de contacto.
- Losas, zapatas: 15-30 W/m² de superficie de contacto.

1.3.1 Pilotes termoactivos

Se define pilote termoactivo como un pilote de elemento de cimentación equipado con un sistema de canales en su interior de forma que un fluido portador de calor (caloportador) puede circular intercambiando calor con el terreno circundante. Si este pilote así equipado se conecta con una bomba de calor se transforma en una instalación de extracción de energía geotérmica somera de baja y muy baja entalpía, con un bajo coste.

Simplificando, un pilote termoactivo es un pilote activado térmicamente mediante la instalación en su interior de un circuito de intercambio de calor. Para profundizar en esta tecnología, se revisará en primer lugar el concepto de pilote, los tipos de pilotes y posteriormente se analizará en sucesivos apartados los elementos que definen un pilote termoactivo, es decir, el propio material del que está construido el pilote, el circuito de intercambio de calor instalado en su interior y el fluido caloportador.

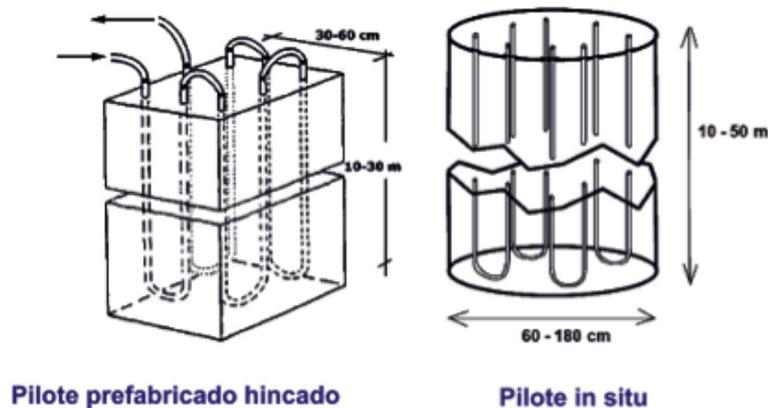


Figura 1.7: Ejemplo de pilotes

1.3.1.1 Elementos de un pilote termoactivo

[SIA05]

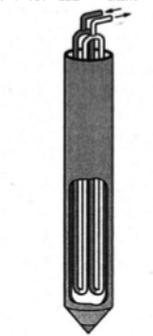


Figura 1.8: Pilote termoactivo

La norma suiza SIA D-0190 define una geoestructura energética como una estructura a la que se le introduce un conjunto de tubos por los que circula un fluido caloportador que hace posible el intercambio de energía geotérmica con el terreno.

Con esta definición, los elementos principales de un pilote termoactivo son el pilote, incluyendo el propio material que compone el pilote (hormigón armado/pre tensionado, acero), el circuito de tubos que constituyen el intercambiador geotérmico y el fluido caloportador

1.3.1.1.1 Hormigón

El material que compone el pilote termoactivo es determinante en el comportamiento térmico del sistema. Para alcanzar un flujo calorífico óptimo entre el terreno y el fluido en circulación en la sonda, el material de relleno empleado debería tener una conductividad térmica lo más elevada posible. Por ello, la conductividad térmica del material componente del pilote debe ser apropiada para las condiciones del sistema geotérmico diseñado y, por supuesto, nunca debe ser menor que la conductividad térmica del terreno que lo rodea.

El hormigón presenta unas buenas condiciones térmicas debido principalmente a su contenido en arena silíceo y a su baja porosidad y permeabilidad. Además, han surgido en los últimos años productos “mejorados térmicamente”, específicamente diseñados para proporcionar una conductividad térmica elevada. La utilización de estos novedosos materiales permite reducir la longitud necesaria de sonda geotérmica o, alternativamente, un aumento del rendimiento de la bomba de calor. En la Tabla 1.1 se exponen algunos materiales habituales de relleno de sondeos geotérmicos.

1. INTRODUCCIÓN

Material	λ (W/m·K)
Arena / Grava seca	0,4
Agua	0,6
Bentonita (10 %) + agua	0,7
Bentonita (9 %) + cemento (9 %) + arena (20 %) con agua	0,7-0,8
Arena húmeda	1,0
Bentonita (12 %) + arena silíceas (50 %) + agua	1,5
Grava saturada	1,8
Hielo	2,3
Cemento (27 %) + arena (58 %) + agua	2,4
Arena silíceas saturada	2,4 - 2,7
Thermocem Cemento con grafito	2,0
Energrount HD 2,1	2,1
Energrount HD 3,0	3,0

Tabla 1.1: Conductividad térmica de algunos materiales utilizados de relleno

La resistencia térmica resultante del pilote dependerá del hormigón utilizado en su construcción, su armadura y el material de relleno utilizado en la inserción de las tuberías. En la Figura 1.9 se pueden observar dichos elementos del pilote.

1.3.1.1.2 Sondas geotérmicas: intercambiador de calor

Cuatro son las principales propiedades de las sondas geotérmicas que conforman el intercambiador de calor geotérmico, las cuales deben ser tenidas en cuenta en el diseño de un pilote termoactivo: el material que compone los tubos (habitualmente plástico), el diámetro del tubo, el espesor de la pared y el tipo de intercambiador (simple U, doble U, etc.) Se analizan a continuación cada una de estas cuatro propiedades:

1. En cuanto al **material** el polietileno (PE) y polibutileno (PB) son más comunes en los intercambiadores de calor enterrados. Ambos son flexibles a la vez que resistentes y pueden unirse mediante fusión por calor para formar empalmes más fuertes que el tubo mismo. El polibutileno es más apropiado



Figura 1.9: Elementos de un pilote termoactivo

en explotaciones de alta temperatura.

2. Por otro lado, la selección del **diámetro de las tuberías** exige llegar a un compromiso entra la caída de presión y el funcionamiento térmico, ya que éste:
 - Debe ser lo suficientemente grande para producir una pérdida de carga pequeña y así necesitar menor potencia de bombeo.
 - Debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar altas velocidades y así garantizar el régimen de turbulencia en el fluido del interior del tubo. De esta manera se favorece el traspaso térmico entre el fluido que circula y la pared interior del tubo. Cuanto mayor sea la turbulencia mayor será el intercambio térmico. La condición que asegura la turbulencia es que el valor del número de Reynolds sea mayor que un valor umbral de 2.300.
3. El **espesor de las paredes** o, lo que es lo mismo, la diferencia entre diámetro nominal o exterior y diámetro interior, es fundamental para la determinación de la resistencia térmica de las tuberías del intercambiador.
4. En cuanto al **tipo de sonda geotérmica**, las más habituales son la U simple, U doble y coaxial que, a su vez, puede presentar una configuración simple o

1. INTRODUCCIÓN

compleja. El comportamiento geotérmico del sistema difiere de un tipo a otro en función del espaciado entre la rama de entrada y la de salida del pilote, que puede favorecer en mayor o menor medida la formación de cortocircuitos térmicos y la distancia entre los tubos y la pared del pilote, que determina el espesor de la capa de hormigón o material de relleno que debe atravesar el flujo de calor entre el terreno y el fluido caloportador. En la Figura 1.10 se muestran secciones perpendiculares de sondas geotérmicas de tipo U simple, U doble y coaxial, donde se observa los aspectos descritos anteriormente.

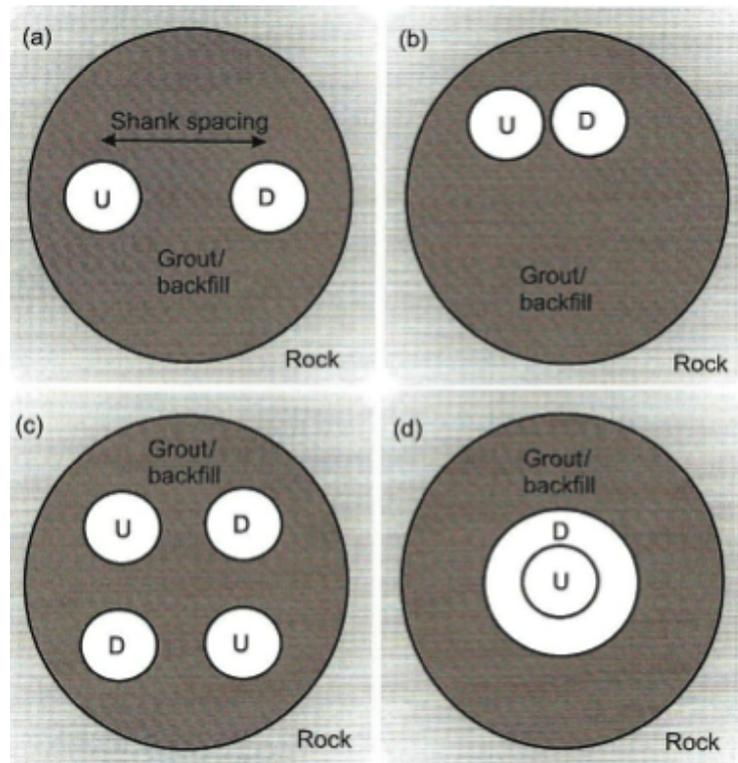


Figura 1.10: Sección de diferentes tipos de intercambiador: U simple con gran espaciado entre tubos, U simple con poco espaciado entre tubos, doble U y coaxial

- **Intercambiador en Simple U**

- Ventajas:
 - * Fácil instalación.

- * Fiable.
- * Bajo coste.
- * Tecnología muy usada.
- Inconvenientes:
 - * Elevada resistencia térmica.
 - * No es posible en sondeos muy profundos.
- **Intercambiador en Doble U**
 - Ventajas:
 - * Baja resistencia térmica.
 - * Baja caída de presión.
 - Inconvenientes:
 - * Más complicado de instalar.
 - * Más caro.
- **Intercambiador coaxial**
 - En este tipo de sondas el intercambio de calor tiene lugar en la rama de inyección o de extracción. El sentido de flujo puede también invertirse en función de que el funcionamiento sea en modo calefacción o refrigeración. El tubo interior debería estar aislado para evitar cortocircuitos térmicos entre flujo de entrada y salida.

Se utiliza la resistencia térmica del pilote para comparar y evaluar la eficiencia de las diferentes tipologías de intercambiadores.

1.3.1.1.3 Fluido caloportador

El fluido circulante por el intercambiador de calor suele ser agua o una mezcla de agua con anticongelante si se prevé en el diseño que el intercambiador geotérmico puede tener riesgo de congelación, debido a un elevado funcionamiento en calefacción o temperaturas muy bajas del terreno.

Las siguientes consideraciones hay que tenerlas en cuenta en la selección de un fluido caloportador: Seguridad, punto de congelación, conductividad térmica, viscosi-

1. INTRODUCCIÓN

dad, estabilidad, coste, corrosividad, propiedades físico-químicas, disponibilidad y regulaciones.

Por tanto, se enumeran los factores críticos de los que depende la elección de un fluido:

- Las características de transferencia de calor del fluido.
- El punto de congelación del fluido.
- Requerimiento de presión y caídas de presión por el rozamiento.
- Corrosividad, toxicidad e inflamabilidad.
- Coste.

Los principales fluidos utilizados como fluido caloportador son:

- **Metanol:** Bajo coste, baja corrosividad, baja viscosidad, buena conductividad térmica, alta volatibilidad, alta inflamabilidad, alta toxicidad.
- **Etilenglicol:** no corrosivo, alta viscosidad, baja inflamabilidad, algo tóxico, limitada vida de servicio. Debe ser reemplazado si el pH baja por debajo de 7,5.
- **Etanol:** Menos caro que el etilenglicol, admite adición de inhibidores de la corrosión, mas viscosidad, menos inflamable, menos tóxico.
- **Propilenglicol:** Más caro que el etilenglicol, no corrosivo, elevada viscosidad, baja inflamabilidad, baja toxicidad.

En Tabla 1.2 se muestran las propiedades físicas de cada uno:

Un buen fluido caloportador debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe tener un coeficiente de expansión muy bajo.
- Debe tener una viscosidad baja, que permita su flujo en el interior del tubo con desgaste de poca energía para la bomba.
- Debe tener una buena capacidad de almacenamiento térmico.
- No debe congelarse en las condiciones de trabajo.
- En países de climas áridos, el fluido debe tener un punto de ebullición elevado.

	Agua	Etilengl.	Propilengl.	Metanol
Densidad a 20°C (g/cm³)	1	0,9259	0,8630	0,6585
Punto de cong. (°C) al 30 % Vol.	0	-13	-12	-26
Punto de ebullición (°C)	100	197	187	64
Calor específ. a 15°C (kJ/Kg·K)	4,187	2,185	02,50371	2,47021
Viscosidad a 0°C (Pa·s)·10⁻³	1,79	57,4	243	0,87
Viscosidad a 20°C (Pa·s)·10⁻³	1,01	20,9	60,5	0,60
Viscosidad a 40°C (Pa·s)·10⁻³	0,655	9,5	18,0	0,45
Conduct. térm. a 20°C (W/m·K)	0,60	0,26	0,2	0,21

Tabla 1.2: Propiedades físicas de los fluidos más empleados en sistemas geotérmicos

1.3.1.2 Activación térmica de pilotes

1.3.1.2.1 Pilotes hormigonados in situ

En el caso de los pilotes hormigonados in situ, la incorporación del circuito geotérmico consiste en fijar el sistema de tubos en el interior de la armadura metálica antes de introducirla en el interior de la perforación. A continuación se instala en ambos tubos, el de entrada al pilote y el de retorno, una válvula de bola y un sensor de presión, en la zona de la cabeza del pilote. Finalmente se presurizan a 6 bars y se mantienen con esta presión durante todas las operaciones de hormigonado y acabado del pilote. El objetivo de esta medida es proteger el circuito de daños o aplastamientos hasta el momento de su puesta en marcha. Con el mismo objetivo se acostumbra a colocar una protección de PVC sobre la válvula de bola y el sensor de presión que se encuentran en la cabeza del pilote.

Durante la introducción en la perforación del tubo de acero por el que va a descender el hormigón, es fundamental no dañar el circuito geotérmico que se encuentran atados a la armadura.

En el caso de pilotes barrenados, los tubos de intercambio geotérmico, una vez fijados y asegurados a la armadura del pilote, pueden ser vibrados o presionados para introducirlos en el terreno.

1. INTRODUCCIÓN

1.3.1.2.2 Pilotes prefabricados

Los pilotes prefabricados vienen ya de la fábrica con el circuito de tubos geotérmico instalado en el interior de la armadura del pilote. Con el fin de permitir que los tubos se conecten hasta el distribuidor mediante los conectores, un bloque de poliestireno se coloca en la zona de la cabeza del pilote. Este bloque se retira tras la hincada del pilote y proporciona el acceso a las tuberías que pueden entonces ser conectadas a las líneas de conexión mediante conectores de termofusión.

En el caso de los pilotes huecos de hormigón armado y los micropilotes, dos bucles, (4 tubos) pueden ser instalados en el interior antes de verter y compactar el hormigón, de forma similar a la de los sondeos. Sin embargo, es imperioso dejar un diámetro interior mínimo de 120 mm.

Todos los tipos de pantallas de pilotes son susceptibles de explotación geotérmica. Para ello, los pilotes deben tener una armadura interior.

1.4 Motivación del Trabajo de Fin de Master

De todo lo anteriormente expuesto surgió la necesidad de estudiar en detalle el comportamiento térmico de un pilote termoactivo. Para ello, se ha desarrollado una instalación experimental con el fin de caracterizar el comportamiento de un pilote prefabricado. Se esperan obtener los siguientes objetivos:

- Modelar matemáticamente la transferencia de calor del pilote con el terreno.
- Obtener la resistencia térmica del pilote.
- Simular mediante TRNSYS y comprobar su ajuste con los resultados obtenidos mediante los ensayos.

*The logic of validation allows us
to move between the two limits of
dogmatism and skepticism.*

Paul Ricoeur

CAPÍTULO

2

Modelado matemático de la transferencia de calor en el terreno

En este capítulo se detallarán las ecuaciones que describen la transferencia de calor con el terreno producida en un pilote activado térmicamente, y posteriormente se caracterizará térmicamente dicho pilote mediante un único parámetro, su *resistencia térmica*.

2.1 Transferencia de calor en un pilote termoactivo

En el apartado 1.2 se describieron los conceptos más importantes que intervienen durante la transferencia de calor con el terreno que utilizaremos a lo largo de esta sección.

Los principales modelos de análisis para evaluar el comportamiento térmico son aproximaciones mediante el modelo de fuente lineal o cilíndrica. El comportamiento térmico entre el intercambiador de calor y la infinita región cercana del terreno

2. MODELADO MATEMÁTICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

se aproxima a una solución analítica de los modelos de fuente lineal y cilíndrica, adaptándolo a la geometría y tipología del intercambiador de calor.

Mogensen [Mog83] fue el primero en aplicar el modelo de fuente lineal para estimar las propiedades térmicas del terreno. Este modelo es comunmente utilizado debido a su simplicidad y rápidos resultados. El campo de temperaturas en el terreno puede describirse en función del tiempo (t) y la distancia radial (r) a la fuente de calor lineal que emite un flujo de calor (q) a lo largo del eje vertical del intercambiador de sólido infinito [Car59].

A continuación a describiremos dicho modelo detalladamente. Partiremos de la ecuación fundamental de la conducción de calor dada para una fuente de calor puntual (q) [Car59]. La fuente puntual disipa su potencia q en el instante $t = 0$ y está localizada en (x', y', z') .

$$T = T_q(r, t) = \frac{q}{8(\pi\lambda t)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} \quad (2.1)$$

donde:

$\alpha = \frac{\lambda}{c}$ es la difusividad térmica del terreno.

$r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2$.

$T(r, t)$ es la temperatura en el punto (x, y, z) en instante t .

El intercambio de calor en un pilote termoactivo no se puede aproximar a una fuente puntual, pero sí a una fuente lineal. Integrando la ecuación 2.1, la ecuación para una fuente lineal es la siguiente:

$$T_q(r, t) = \frac{q}{8(\pi\lambda t)^{\frac{3}{2}}} \int_{-\infty}^{\infty} dz' e^{-\frac{r^2}{4\alpha t}} = \frac{q}{4\pi\lambda t} e^{-\frac{\{(x-x')^2+(y-y')^2\}}{4\alpha t}} \quad (2.2)$$

La fuente lineal atraviesa el punto (x', y') y transcurre paralela al eje z .

Ahora es necesario introducir la condición de que el calor q no se disipa únicamente en el instante $t = 0$, sino es una fuente de calor que dura un periodo de tiempo. A partir de la ecuación 2.2, podemos derivar una expresión para una fuente lineal continua. Si la potencia $\Phi(t')$ es inyectada, iniciándose en el instante $t = 0$ y la temperatura del suelo es 0, en el instante t la temperatura será:

$$T_q(r, t) = \frac{1}{4\pi\lambda t} \int_0^t \Phi(t') e^{-\frac{r^2}{4\alpha(t-t')} \frac{dt'}{t-t'}} \quad (2.3)$$

En nuestro caso, al ser $\Phi(t') = q$ y constante, tenemos:

$$T_q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda t} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds = \frac{q}{4\pi\lambda t} E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (2.4)$$

donde:

$$E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) = \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds$$

Reordenando la expresión 2.4, si queremos evaluar la variación de la temperatura con el tiempo, a partir de una distancia radial de la fuente lineal, tendríamos:

$$T_q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda t} E_t \left(\frac{\alpha t}{r^2} \right) \quad (2.5)$$

donde:

$$E_t(\tau) = E_1 \left(\frac{1}{4\tau} \right) = \int_{\frac{1}{4\tau}}^{\infty} \frac{1}{s} e^{-s} ds$$

$$\tau = \frac{r^2}{\alpha t}$$

La función $E_t(\tau)$ proporciona la variación de temperatura con el tiempo a una distancia radial r del intercambiador de calor.

Para simplificar la ecuación 2.5, la función $E_t(\tau)$ se puede aproximar a la función $\ln(4\tau) - \gamma$ tal y como se observa en la Figura 2.1.

Por tanto, para $\tau \geq 5$ podemos realizar la siguiente simplificación:

$$E_t(\tau) \approx \ln(\tau) - \gamma \quad (2.6)$$

donde:

$$\gamma = 0,5772 \text{ (constante de Euler)}$$

Como $\tau = \frac{\alpha t}{r^2}$, resulta:

$$E_t \left(\frac{\alpha t}{r^2} \right) \approx \ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \quad (2.7)$$

2. MODELADO MATEMÁTICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

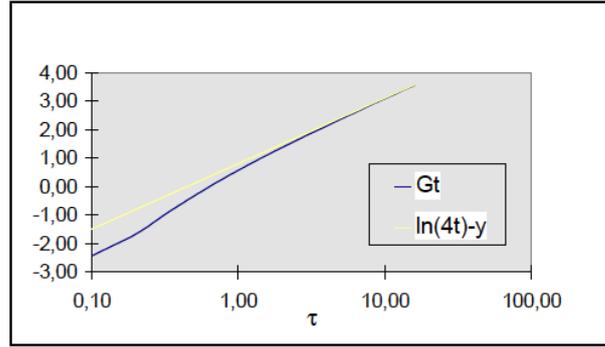


Figura 2.1: Gráfica de las funciones $G_t(\tau)$ y $\ln(4\tau) - \gamma$ frente a τ . Se observa que para valores grandes de τ la función $G_t(\tau)$ puede aproximarse a $\ln(4\tau) - \gamma$

Entonces, con un error máximo del 10 %, resulta:

$$T_q(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right) = \frac{Q}{4\pi\lambda L} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right) \quad (2.8)$$

Cuando $\tau = \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \Rightarrow t \geq \frac{5r^2}{\alpha}$

La temperatura en la pared del intercambiador, por ejemplo, para $r = r_0$, sería:

$$T_q(r, t) = T_{r_0, q}(t) = \frac{Q}{4\pi\lambda L} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_0^2} \right) - \gamma \right) \quad \text{para } t \geq \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (2.9)$$

Finalmente, introduciendo en la ecuación 2.9 la temperatura del terreno sin perturbar:

$$T_{r_0}(t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\lambda L} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_0^2} \right) - \gamma \right) \quad \text{para } t \geq \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (2.10)$$

La ecuación 2.10 expresa la relación entre la temperatura del terreno sin perturbar, T_0 , y la temperatura en la pared del intercambiador de calor, $T_{r_0}(t)$. Existe otra importante relación entre T_0 y la temperatura del fluido portador del calor, T_f , ya que en intercambiador de calor existe una *resistencia térmica*, R_b [K/W/m] (que será desarrollada en el apartado 2.2), entre el fluido que circula en el interior del intercambiador de calor y la pared del intercambiador de calor.

2.1 Transferencia de calor en un pilote termoactivo

La resistencia térmica en una inyección de calor (q) se define como:

$$T_f - T_{r_0}(t) = R_b \cdot q \quad (2.11)$$

donde T_f se puede aproximar a la temperatura media del fluido en el intercambiador:

$$T_f = T_{ave} = \frac{T_{in} - T_{out}}{2} \quad (2.12)$$

Luego, aplicando la ecuación 2.11 en la ecuación 2.10, resulta:

$$T_f + R_b q - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda L} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_0^2} \right) - \gamma \right) \quad \text{para } t \geq \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (2.13)$$

Que puede también escribirse como:

$$T_f = \frac{Q}{4\pi\lambda L} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_0^2} \right) - \gamma \right) + \frac{QR_b}{L} + T_0 \quad \text{para } t \geq \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (2.14)$$

Para un mejor análisis, podemos adaptar la ecuación 2.14 a la ecuación de una recta [MUM⁺13]:

$$T_f(t) = k \cdot x(t) + m \quad (2.15a)$$

Siendo k la pendiente de la curva, que relaciona la conductividad térmica del terreno según la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{4\pi\lambda} \quad (2.15b)$$

Y m es la ordenada en el origen, que corresponde al valor cuando el tiempo es igual a 0. Considerando la resistencia térmica un valor constante en el tiempo:

$$m = T_0 + R_b Q_z \quad (2.15c)$$

Y el termino dependiente del tiempo:

2. MODELADO MATEMÁTICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

$$x(t) = Q_z \left(\ln \left(\frac{t}{t_0} \right) - \gamma \right) \quad \text{siendo } t_0 = \frac{r_0^2}{4\alpha} \quad (2.15d)$$

Se puede observar claramente que la ecuación 2.14 se corresponde con la ecuación 2.15a, usando los valores de 2.15b, 2.15c y 2.15d.

También puede ser interesante despejar la resistencia térmica, R_b , de la ecuación 2.14:

$$R_b = \frac{T_f(t) - T_0}{Q_z} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r^2} \right) - \gamma \right) \quad (2.16)$$

Para finalizar, en el caso de diferentes escalones de potencia inyectada, la temperatura media del fluido puede ser considerada como una suma de la contribución de cada escalón térmico durante cada intervalo. Se describe este análisis en escalón [Esk87]:

$$\Delta T(q_1, q_2, \dots, q_n) \equiv \Delta T(q_1) + \Delta T(q_2) + \dots + \Delta T(q_n) \quad (2.17)$$

La inyección de calor total es equivalente a las etapas de pulsos constantes superpuestos en el tiempo. Se tendría:

$$q(t) = \begin{cases} q_1, & t_0 < t < t_1 \\ q_2, & t_1 < t < t_2 \\ \dots & \\ q_N, & t_{N-1} < t < t_N \end{cases} \quad (2.18)$$

siento $t_0 = 0$ el instante inicial.

Teniendo en cuenta el principio de superposición, la temperatura del fluido en el intercambiador puede ser expresada por la suma de cada pulso de calor:

$$T_f = \sum_{n=1}^N \frac{q_n - q_{n-1}}{4\pi\lambda} \ln(t - t_n) + \left[q_n \cdot \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_0 \right] \quad (2.19)$$

2.2 Caracterización térmica de un pilote termoactivo

Podemos definir la resistencia térmica total del terreno (R_T) a la resistencia térmica conjunta del terreno y del pilote termoactivo, por lo que se puede expresar como la suma de ambas resistencias. La resistencia térmica del terreno (R_{ground}) comprende la resistencia térmica del terreno que rodea al pilote. La resistencia térmica del pilote (R_b) es la resistencia térmica entre el fluido portador de calor en interior del pilote y la pared exterior del pilote.

$$R_T = R_b + R_{ground} \quad (2.20)$$

En la Figura 2.2 se muestra la resistencia térmica global:

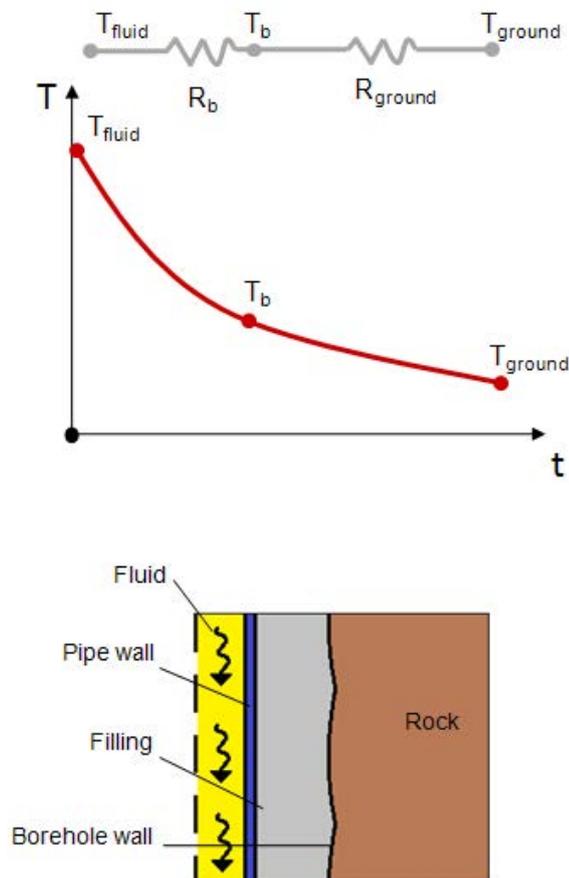


Figura 2.2: Resistencia térmica global en un pilote termoactivo

2. MODELADO MATEMÁTICO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La resistencia térmica en condiciones de flujo de calor estacionario se puede calcular mediante la siguiente ecuación [Hel91]:

$$R_{ground} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left\{ \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_b^2} \right]^2 \ln \left(\frac{r_1}{r_b} \right) - \frac{3}{4} - \frac{r_b^2}{2 \cdot (r_1^2 - r_b^2)} \right\} \quad (2.21)$$

donde:

R_{ground} es la resistencia térmica del terreno [K/(W/m)]

λ es la conductividad térmica del terreno [W/m·K]

r_1 es el radio de volumen de terreno asociado al pilote [m]

r_b es el radio del pilote [m]

La conductividad térmica del terreno es la capacidad del suelo para transferir el calor desde las paredes del pilote a través del terreno que lo rodea y viceversa. El calor volumétrica capacidad (c_p) es la capacidad del suelo para almacenar energía térmica. Estos parámetros están relacionados con la difusividad (α), que puede definirse como una relación entre la capacidad del terreno de transmitir calor y su capacidad para almacenar la energía.

La caracterización térmica de un pilote termoactivo viene dada por su propiedad térmica más importante que es su *resistencia térmica*, R_b , [K/(W/m)]. La resistencia térmica la hemos presentado en apartado anterior 2.1 y, tal como vimos en la ecuación 2.11, puede definirse como la capacidad del pilote de oponerse al flujo del calor, ya que al establecerse un flujo de calor estacionario se observa una proporcionalidad entre la carga térmica inyectada y la pérdida de temperatura. El coeficiente de proporcionalidad es la resistencia térmica del pilote (R_b):

$$T_f - T_{r0}(t) = R_b \cdot q \quad (2.22)$$

Por tanto, cuanto menor sea el valor de la resistencia térmica en el pilote mejor se comportará éste térmicamente.

Permite cuantificar la pérdida de calor entre el fluido caloportador y el terreno a través del pilote, en régimen de flujo de calor estacionario y bajo una carga constante. La extracción de una carga térmica específica q (W/m) crea una diferencia

2.2 Caracterización térmica de un pilote termoactivo

de temperatura ΔT (K) entre el fluido caloportador y el terreno que rodea el pilote termoactivo.

Esta diferencia de temperatura no depende de las condiciones geológicas e hidrogeológicas locales, sino que depende de otros factores, como el tipo de pilote, su diámetro, número y disposición de los tubos en el interior del pilote, el régimen del flujo en el interior de los tubos, la conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción del pilote, etc.

La resistencia térmica del pilote termoactivo incluye la resistencia térmica del fluido que circula en el interior del pilote (R_f), la resistencia térmica de la pared de la tubería (R_{bhf}), así como la resistencia térmica de los materiales que conforman el pilote (R_{bhf}). Por tanto, la resistencia térmica del pilote se puede definir como la suma de estas tres componentes:

$$R_b = R_f + R_{bhf} + R_{bhf} \quad (2.23)$$

*Alice came to a fork in the road.
“Which road do I take?”, she asked.
“Where do you want to go?”,
responded the Cheshire Cat.
“I don’t know.” Alice answered.
“Then”, said the Cat, “It doesn’t
matter”.*

Lewis Carroll, Alice in
Wonderland

CAPÍTULO

3

Validación experimental

En este capítulo se describe el proceso de ejecución del pilote termoactivo y de las instalaciones necesarias para la realización de las pruebas térmicas. Posteriormente se detallan los ensayos en los que se sometió al pilote a sollicitaciones térmicas, para así poder evaluar su respuesta térmica, con la cual poder deducir los parámetros más importantes que definen su comportamiento térmico. Finalmente, se recogen los resultados de dichos ensayos.

3.1 Descripción del pilote

[dGdSP+13]

Se determinó que la longitud del pilote prefabricado fuese de 17.40 m en dos piezas de 8.70 m conectadas con una junta ABB de Clase A. Esta longitud permite, por un lado, alcanzar la capacidad portante nominal de 100 toneladas a la que va a estar sometido el pilote durante el ensayo de caracterización termo-mecánica y, por otro, evita tener que transmitir al pilote tensiones muy elevadas durante la hinca, lo que podría dar lugar a algún problema en la instrumentación alojada dentro del mismo.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

El pilote fue fabricado con un hormigón de resistencia característica en probeta cilíndrica de 50 MPa a 28 días, con sección cuadrada de 350 mm de lado y longitudinalmente presenta un hueco central cilíndrico de 120 mm de diámetro. En la Figura 3.1 se muestra la configuración de una de las dos piezas que conforman el pilote.



Figura 3.1: Croquis del pilote prefabricado

Las dos piezas fueron transportadas desde la factoría de pilotes que Rodio Kronsa tiene en Algete al emplazamiento del ensayo situado en la Universidad de Valencia (Figura 3.2)



Figura 3.2: Pilote en el campo de pruebas

3.1.1 Instrumentación del pilote

Durante los ciclos de carga térmica y mecánica se medirá la distribución de temperatura a lo largo del pilote, así como de deformaciones, tensiones, carga axial, y resistencia movilizada por fuste. Para ello, además de la instrumentación embebida en el interior del pilote durante el proceso de fabricación (14 extensómetros de cuerda vibrante y 16 sensores de fibra óptica), se han instalado sensores en la cabeza del pilote, los anclajes y el sondeo adyacente, enumerados en la Tabla 3.1.

Elemento de ensayo	Instrumentos de control
Pilote de ensayo (externos)	4 sensores analógicos para medir desplazamientos verticales de la cabeza 4 LVDT para medir desplazamientos verticales de la cabeza 2 sensores analógicos para medir desplazamientos horizontales de la cabeza 2 LVDT para medir desplazamientos horizontales de la cabeza 1 LVDT en el bastidor de reacción 1 Célula de carga en cabeza
Pilote de ensayo (internos)	14 Extensómetros de cuerda vibrante con sensores de temperatura incorporados, cada 7 metros en armaduras diametralmente opuestas a lo largo de los 17 m de pilote 16 Sensores de fibra óptica, con medida de deformación y temperatura, dispuestos en dos sistemas en serie colocados en armaduras diametralmente opuestas
Anclajes	3 Extensómetros de cuerda vibrante (uno en cada anclaje) con sensores de temperatura incorporados, para medir deformación y temperatura
Sondeo adyacente	Sistema en serie de termistores a 6 niveles distintos a lo largo de 16 metros.

Tabla 3.1: Resumen de instrumentación del pilote termoactivo

Se consideró interesante usar una instrumentación clásica consistente en extensómetros de cuerda vibrante, galgas extensométricas, células de carga y sensores de temperatura, junto con sensores de fibra óptica, más novedosos pero sin datos que confirmen su eficacia. De esta forma, se utilizarán los datos de los extensómetros para validar los resultados de la fibra óptica y determinar de esta manera si son útiles

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

para este tipo de estudios (Figura 3.3 y Figura 3.4).

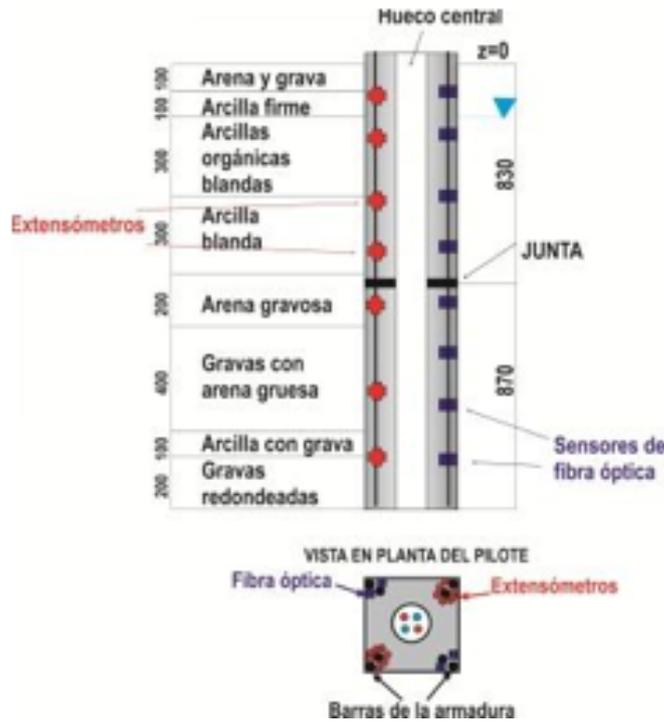


Figura 3.3: Perfil del terreno e instrumentación en el pilote

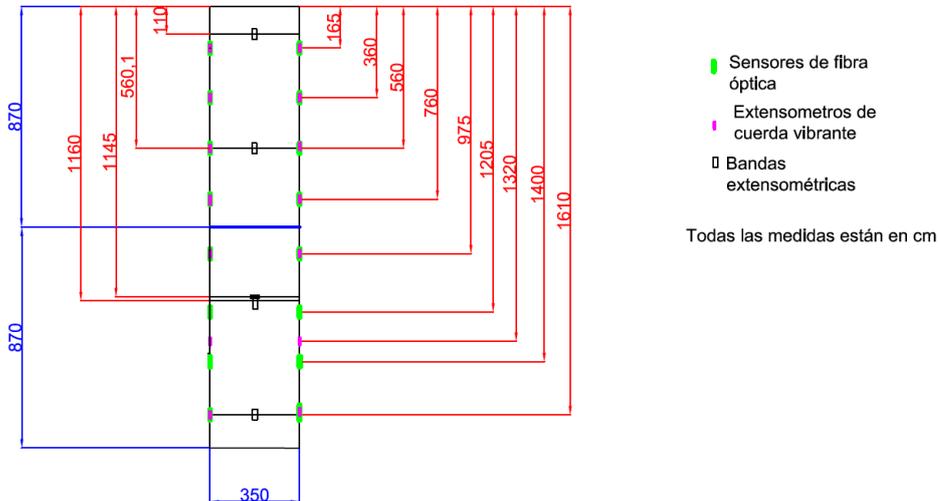


Figura 3.4: Croquis de la instrumentación instalada en el pilote

3.1.2 El equipo de hincia

El equipo de hincia utilizado es una hincadora hidráulica Junttan PM-20, armado con un martillo JUNTAN HKK7AS con maza de 7 t, equipo que consta de una torre guía montada sobre un carro de orugas (Figura 3.5).



Figura 3.5: Equipo de hincia

Por dicha torre se desliza la maza con caída libre y altura regulable con un peso de 70 kN que proporciona la energía de hincia; el accionamiento de esta maza es hidráulico lo que permite un perfecto control de la energía de hincia. Este modelo permite alturas de caída variables hasta un máximo de 1.20 m, con una eficiencia (energía real/energía teórica) del 95 %.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

3.1.3 El proceso de hinca

El hincado del pilote se llevó a cabo el día 27 de junio. Previamente se dejó realizado un cajeadado que permitiera la hinca del pilote ya que en la zona existía una solera perteneciente a una antigua edificación colindante. De igual forma se elimina un pequeño murete de mampostería existente y perteneciente a la misma edificación que impediría el paso a las orugas de la máquina.



(a) Izado del pilote



(b) Presentación y nivelado



(c) Proceso de hinca



(d) Finalización primer tramo

Figura 3.6: Proceso de la hinca

En la misma zona se encuentra también una acequia de riego, acequia que a primera vista parece de sección completa (cubierta) formada por tubería armada de hormigón prefabricado pero cuya clave, en algunos tramos dentro del radio de acción de la máquina de hinca, aparece descubierta. Para protegerla y conseguir un mayor reparto del peso de la máquina se extiende una pequeña capa de grava. También se procede al desbroce del terreno vegetal y retirada de la vegetación existente y que dificulta las maniobras.

Con la ejecución estas operaciones preliminares se permite ya la hinca del pilote prefabricado. El primer tramo se marca con pintura en toda su longitud y se protege la cabeza con la utilización de una placa de hinca, un elemento de acero destinado a proteger la junta y sus tetones de la energía de los impactos de la maza. Las siguientes figuras permiten ver el proceso de la hinca en sus diferentes pasos (Figura 3.6)

Tras la hinca del primer tramo, se procede a realizar las conexiones de la instrumentación (Figura 3.7), conectando por un lado los sensores de fibra óptica inferiores (4 conectores con sus correspondientes manguitos de protección) con los sensores de fibra óptica alojados en el segundo tramo y por otro lado, dando continuidad a el cableado de los extensómetros de cuerda vibrante inferiores (6 conectores) para permitir su salida por la cabeza del pilote. También se empalman los tramos superiores e inferiores del cableado correspondiente a las bandas extensométricas (6 empalmes) instaladas en el pilote.



Figura 3.7: Conexionado del material de instrumentación

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Una vez extraído todo el cableado del cajetín inferior y preparados sus extremos para las conexiones (limpieza, saneado, soldado, etc.) se iza el segundo tramo hasta presentarlo al primero y mantener en posición para permitir la apertura de la caja del segundo tramo y extraer todo el cableado de espera correspondiente al tramo superior (Figura 3.8).



Figura 3.8: Izado del segundo tramo de pilote y colocación en posición para la realización de las conexiones

Una vez realizadas todas las conexiones, se cierran los dos cajetines y mediante un mortero de cemento se nivela e iguala la superficie del pilote para evitar en la medida de lo posible que pueda entrar cualquier tipo de material o agua proveniente del terreno al interior del mismo y evitar la aparición de tapones y adherencias durante el proceso de hincado que resta.

Tras colocar los pasadores con ayuda de una maza, se continúa con el proceso de hincado (Figura 3.9).



Figura 3.9: Proceso de hincado del segundo tramo

Se comprueba que el pilote ha llegado a la profundidad estimada en proyecto, 17 m, dejando aproximadamente unos 40 cm de longitud libre sobre la plataforma de trabajo. Esta distancia permite un fácil acceso a los cajetines superiores de salida del cableado del pilote, que se abren para realizar unas primeras comprobaciones sobre la instrumentación (Figura 3.10).



Figura 3.10: Comprobación de la instrumentación

Durante la hinca del prototipo se realizó un pilote-penetrómetro, que en esencia consiste en la realización de un perfil de resistencia del terreno a la penetración

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

contabilizando el número de golpes necesarios para hincar 20 cm a lo largo de todo el fuste.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.11.

3.1.4 Activación térmica del pilote

El paso siguiente a la hincada del pilote es la instalación de la sonda geotérmica que, una vez introducida en el interior del pilote, permitirá activarlo térmicamente y convertirlo en un elemento de intercambio de calor con el terreno. En el caso del pilote objeto de estudio en este proyecto, se decidió instalar una sonda en doble U, de 25 mm de diámetro nominal.

Por ello, se contrató y recibió en obra el siguiente material:

- Sonda doble U, de diámetro de 25 mm. y 50 metros de longitud.
- Separadores.
- Distinto material auxiliar para el montaje del conexionado con la instalación térmica: pie de sonda, separadores, conexiones, etc.

Se revisa in situ que tanto la sonda como los elementos auxiliares cumple con los requisitos técnicos previstos. En este sentido, los tubos de polietileno de las sondas geotérmicas deben estar fabricados de una sola pieza, sin uniones en el interior del sondeo a excepción de la pieza en U, o pie de sonda, que debe venir soldada de fábrica y sometida a un ensayo de presión. Por otro lado, las uniones de los tubos del intercambiador de calor vertical con las tuberías horizontales de distribución han de ser resistentes a las heladas y a la corrosión y realizarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante por un técnico cualificado.

3.1.4.1 Introducción de la sonda

Una vez comprobado que la sonda y elementos auxiliares están en perfecto estado y cumplen con los requisitos descritos, se procede a su introducción dentro del pilote. Para facilitar la introducción, se desenrolla previamente la sonda y se comienza la maniobra de descenso lentamente y con las debidas precauciones con el fin de

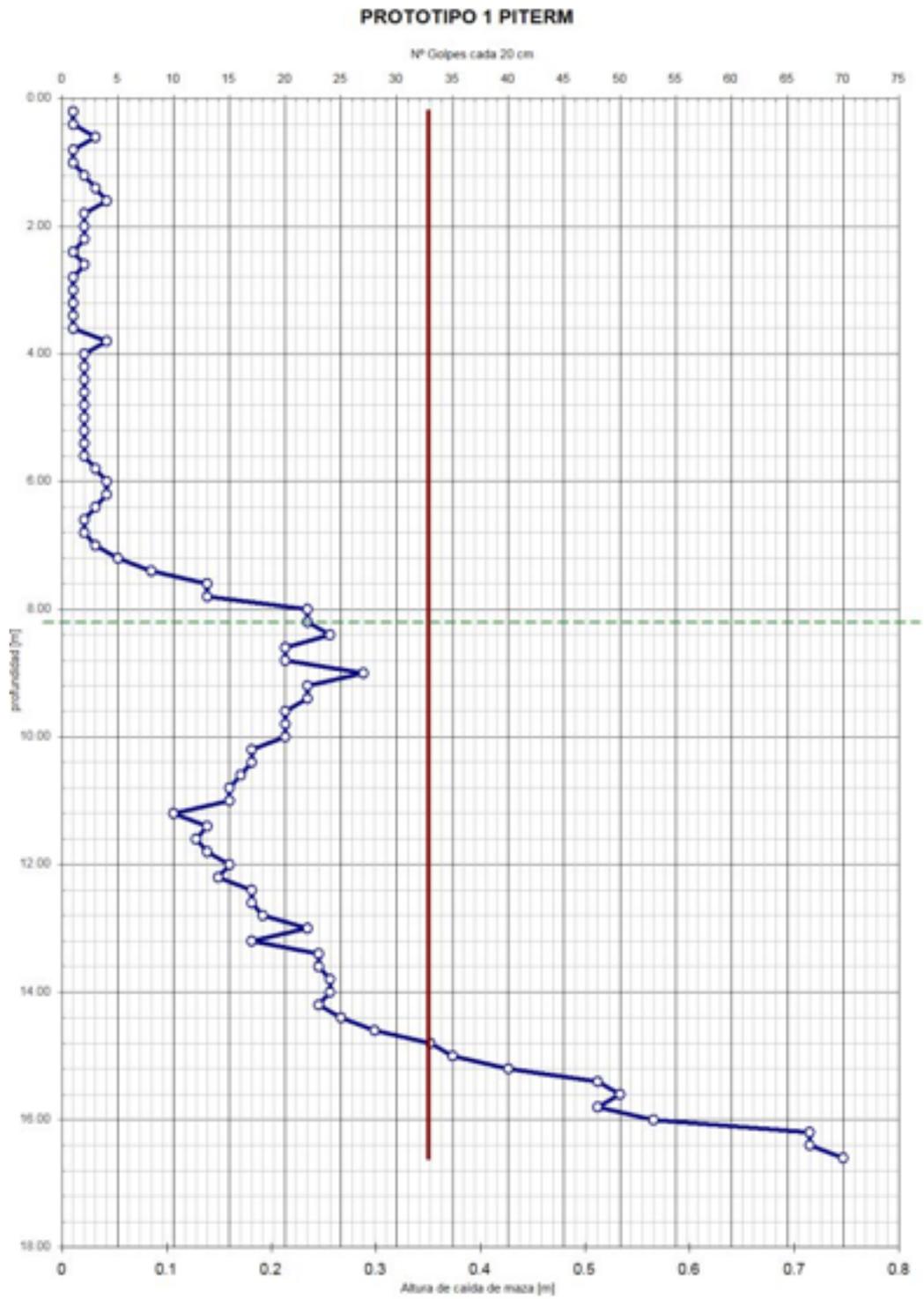


Figura 3.11: Perfil de resistencia a la penetración

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

evitar roces de la tubería con el hormigón del pilote y garantizar el descenso lo más recto posible hasta el fondo de la cavidad (Figura 3.12).



Figura 3.12: Introducción de la sonda en el interior del pilote

Una vez introducida la sonda geotérmica, se cortó la tubería sobrante y mediante electrosoldadura se añadieron los codos y se unió a la tubería horizontal (Figura 3.13).



Figura 3.13: Conexión mediante codos a la tubería horizontal

Posteriormente, se realizó una prueba de estanqueidad para garantizar la ausencia de fallos o microroturas que pudieran provocar fugas durante todo el periodo de experimentación posterior en el pilote. La prueba consistió en llenar las tuberías de agua a una presión de 5 bar durante 2h. Después de dicho tiempo se comprobó que el descenso de la presión fue menor del 10 %.

3.1.4.2 Inyección del mortero de alta conductividad térmica

A continuación se rellenó el espacio anular existente en torno a las sondas geotérmicas en el interior de la tubería metálica del centro del pilote con un mortero de elevada conductividad térmica que facilitara en la medida de lo posible la transferencia de calor entre el fluido caloportador del interior de la sonda geotérmica y el terreno.

La composición del material de relleno debe adecuarse en función de las características geológicas, hidrogeológicas y medioambientales de las formaciones atravesadas, garantizando siempre la inocuidad para el medio en el que se inyecta. Además de esto, debe ser capaz de soportar las temperaturas de trabajo proyectadas y a su vez permitir las dilataciones y contracciones del intercambiador de calor.

Desde un punto de vista energético el material de relleno del interior del hueco del pilote debería ser un mortero mejorado con una conductividad térmica mayor de 2 W/mK. Por otro lado, se han evaluado también los requerimientos atendiendo al comportamiento mecánico del mortero una vez fraguado y a las características reológicas de la mezcla húmeda. En el primer caso se ha considerado necesario alcanzar unas resistencias mecánicas y un comportamiento tenso-deformacional similar al del cuerpo del pilote para evitar comportamientos diferenciales. Las características del mortero húmedo se definieron atendiendo a los condicionantes de su puesta en obra y a los aspectos críticos del resultado final. De este modo se fijaron requerimientos respecto a su densidad, viscosidad, tiempo abierto, calor de hidratación, retracción, decantación ó agua libre, tiempo de fraguado y tamaño máximo de partícula, entre otros.

Una vez analizados los resultados de todas las variables ensayadas, se ha procedido a la formulación del producto definitivo para su utilización en el ensayo experimental 1. Las características de este mortero (FCK5025), se recogen en la Tabla 3.2:

Una vez recibido y comprobado el material, se procedió a mezclar en batidora los ingredientes siguiendo las instrucciones y dosificación indicadas por el fabricante. Durante la fabricación del mortero se puso atención y cuidado en la adición de los componentes de forma gradual de forma que se favorezca la adecuada mezcla de

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Agua de amasado por saco	4,15 litros
Dosificación por m³	293,3 l de agua — 706,7 Kg de FCK5025
Densidad del mortero	2,07 t/ m ³
Conductividad Térmica	≥ 2,5 W/mK
Resistencia a compresión a 2 días	30 N/ mm ²
Resistencia a compresión a 28 días	≥ 50 N/ mm ²
Resistencia a flexión	≥ 6 N/ mm ²
Presentación	56 sacos de 25 kg en palets (1.400 kg)

Tabla 3.2: Características del mortero FCK 5025

los mismos (Figura 3.14). Fue necesario un especial hincapié en la dosificación del agua, fundamental para garantizar la textura final necesaria del mortero, dada la fuerte influencia de la temperatura ambiental, que puede acelerar o retardar el fraguado, dificultando la fabricación del mortero.



Figura 3.14: Mortero durante el proceso de mezclado

Una vez fabricado el mortero, se introdujo en el interior de la tubería metálica instalada en el centro del pilote, donde previamente se había instalado la sonda. El proceso de relleno se realizó mediante método ascendente, desde el fondo hasta la superficie, a través de una tubería de inyección de PE, evitando así la formación de huecos sin rellenar en el interior del pilote.

La inyección se detiene cuando la lechada desborda en superficie.

3.2 Descripción de la instalación generadora de cargas térmicas

Finalmente, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del sistema de sondas geotérmicas instaladas en el interior del pilote ya relleno de mortero, se procedió a realizar una prueba de presión consistente en aumentar la presión de las sondas hasta 6 bar durante 2h y comprobar, mediante lectura en un manómetro, que la presión no desciende más de un 10 %. El éxito de esta prueba confirma que las sondas no han sido dañadas durante los pasos de descenso e instalación en el interior del pilote y posterior relleno de con el mortero.

La instalación se dejó a una presión de servicio de 3 bar hasta la conexión de las sondas con el equipo de generación de las cargas térmicas.

3.2 Descripción de la instalación generadora de cargas térmicas

El objetivo principal de la instalación será el de la producción de las solicitaciones térmicas necesarias para la ejecución de los ensayos térmicos diseñados y descritos en el apartado 3.3, además de la monitorización de las variables asociadas.

Para representar este comportamiento se diseñará una instalación compuesta por una resistencia que produce agua caliente. Este fluido, mediante una bomba de circulación y un sistema hidráulico (valvulería, vaso de expansión, etc.), será enviado hacia el pilote termoactivo, a través de las tuberías alojadas en su interior, intercambiando calor con el terreno circundante del mismo modo que se realizaría en una instalación de climatización geotérmica.

Las características de la instalación son las siguientes:

- Generación de frío y calor mediante una resistencia.
- Regulación de la potencia inyectada.
- Monitorización de caudal, temperatura de entrada, temperatura de salida y presión.
- Control remoto del proceso.
- Registro de datos.

Para la determinación de las características térmicas del pilote, se forzarán pulsos de inyección de calor en un bucle enterrado y se medirá su respuesta en temperatu-

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

ra. Este proceso nos ofrece un método experimental para obtener las características térmicas del pilote y nos ofrece una alternativa al cálculo de estas características mediante los métodos tradicionales, como por ejemplo, estimaciones basadas en descripciones del suelo mediante mapas geológicos, al incorporar más información y más precisa.

El funcionamiento del equipo de generación térmica se basará en un proceso totalmente autónomo gracias a un diseño íntegramente automatizado que permitirá mantener una diferencia de temperatura constante entre la entrada y la salida del bucle cerrado (para mantener una potencia inyectada constante que permita la validación posterior de los ensayos mediante su modelado matemático) o bien realizar ensayos de carga límite, alternando la inyección y extracción de calor en sus condiciones más extremas. Además será posible su configuración y adquisición de datos de forma remota mediante transmisiones GSM.

Los principales componentes del sistema serán: una resistencia, una válvula de tres vías para regular la temperatura del agua inyectada, un medidor de flujo, varios medidores de temperatura y un equipo de control.

Todo el sistema se integrará en un remolque, siendo por lo tanto un equipo móvil.

La regulación de la potencia inyectada al pilote se realizara a través de un panel de control. Éste recibe los datos de temperatura de entrada y salida al pilote, y actúa sobre la válvula de tres vías, con el objetivo de mantener las premisas del experimento que se esté desarrollando.

La gestión del dispositivo se realizara con una aplicación informática que recibirá los datos vía GSM. Con esta aplicación se seguirán los detalles de los experimentos de manera remota.

En el panel de control (Figura 3.15) se monitoriza cada uno de los dispositivos del sistema, así como algunos de los datos fundamentales del experimento, temperaturas de entrada y salida, temperatura del suelo y temperatura ambiente.

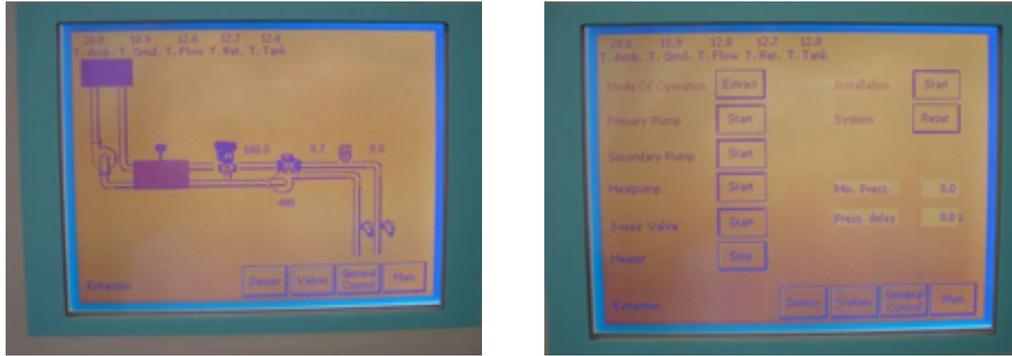


Figura 3.15: Pantalla con el sistema de regulación

3.2.1 Conexionado con el pilote termoactivo

El sistema de aplicación de cargas se compone de la instalación térmica (detallada anteriormente), junto con el sistema de conexionado al pilote. Se situaron dos uniones en Y para juntar cada ida y retorno de la sonda geotérmica en doble U. También se han instalado dos sondas PT100 en la cabecera para recoger los datos de la temperatura justo a la entrada y la salida del pilote.

En la Figura 3.16 se puede observar en detalle el sistema de conexionado:

El esquema de la instalación de producción térmica se puede observar en la Figura 3.17.

3.3 Protocolo de ensayos

Mediante la instalación descrita en el apartado 3.2, se podrá controlar en todo momento las sollicitaciones térmicas a las que es sometido el pilote pudiendo variar las condiciones de ensayo, es decir, los pulsos térmicos (potencia térmica) inyectados, simulando la carga térmica del “edificio” a la que está sometida el pilote.

Los objetivos principales de las pruebas térmicas son dos:

- Caracterizar el comportamiento térmico del pilote.
- Obtener la respuesta térmica del pilote bajo sollicitaciones térmicas.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL



(a) Conexionado con el pilote



(b) Vista general



(c) Salida de la caseta



(d) Inst. generadora térmica

Figura 3.16: Sistema de conexionado del pilote termoactivo con la instalación generadora térmica

Posteriormente, a partir del análisis de los resultados experimentales y de una evaluación crítica del comportamiento del pilote se desarrollará un modelo para el correcto dimensionamiento de los pilotes geotérmicos incorporando la influencia de ambos tipos de solicitaciones.

Se realizaron el siguiente protocolo de ensayo con el fin de comprobar el comportamiento térmico del sistema pilote + suelo en condiciones reales y bajo la carga mecánica actual.

En la Figura 3.18 se detalla las características del ensayo.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Objetivo

El objetivo de estos ensayos es comprobar el comportamiento térmico del pilote en situación real (con carga mecánica) a diferentes potencias de carga térmica. Se identificarán las propiedades térmicas inherentes al pilote. Con carga mecánica fija.

Características del ensayo

Sensores utilizados :

Monitorización de la instalación térmica: temperaturas y caudal
Temperatura entrada y salida del pilote
Sensores fibra óptica del pilote
Sensores térmico sondeo instrumentado

Tiempo de muestreo :

Monitorización del carrito: Cada 3 minutos
Temperatura entrada y salida del pilote: Cada 3 minutos
Sensores fibra óptica del pilote: Cada 3 minutos
Sensores térmico sondeo instrumentado: Cada 3 minutos

El salto térmico para proporcionar la potencia a inyectar será de 1, 2 y 3 grados.

Descripción

Tarea	Potencia inyectada (W)	Tiempo (horas)
Obtención del perfil de temperaturas en reposo	0	24
Ensayo con 700W de calor (40 W/m * 17.4m)	700	120
Ensayo con 2100W de calor (120 W/m * 17.4m)	2100	120
Ensayo con 1050W de calor (60 W/m * 17.4m)	1050	120
Estabilización térmica. Comprobación de que el perfil de temperaturas coincide con el inicial de antes de los ensayos	0	240
Ensayo con 1400W de calor (80 W/m * 17.4m)	1400	120



Duración estimada

La duración estimada de esta fase de ensayos es de 32 días.

Figura 3.18: Características del ensayo

3.4 Ejecución de las pruebas y resultados

Los ensayos térmicos se ejecutaron empleando el sistema de aplicación de cargas térmicas (detallado en el apartado 3.2, siguiendo el programa de ensayos térmicos que se describe en el apartado 3.3).

3.4.1 Cronograma de los ensayos

En la Figura 3.19 puede observarse el cronograma de los ensayos realizados.

3.4.2 Perfil térmico del pilote

Antes de iniciar el ensayo se toman datos del perfil térmico con los siguientes objetivos:

- Comprobar la estabilidad del terreno no perturbado térmicamente.
- Obtener un perfil de temperatura del terreno sin perturbar, punto de partida para al análisis de cada uno de los ensayos.

Para ello, se registra el perfil de la temperatura, a partir de los sensores de fibra óptica embebidos en el interior del pilote, cada 5 segundos durante 30 minutos. De dichos valores registrados se calculan los valores medios. En la Figura 3.20 se representa la temperatura media frente a la profundidad (dada por cada sensor).

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

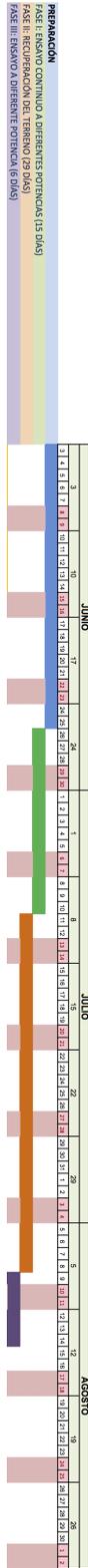


Figura 3.19: Cronograma de los ensayos

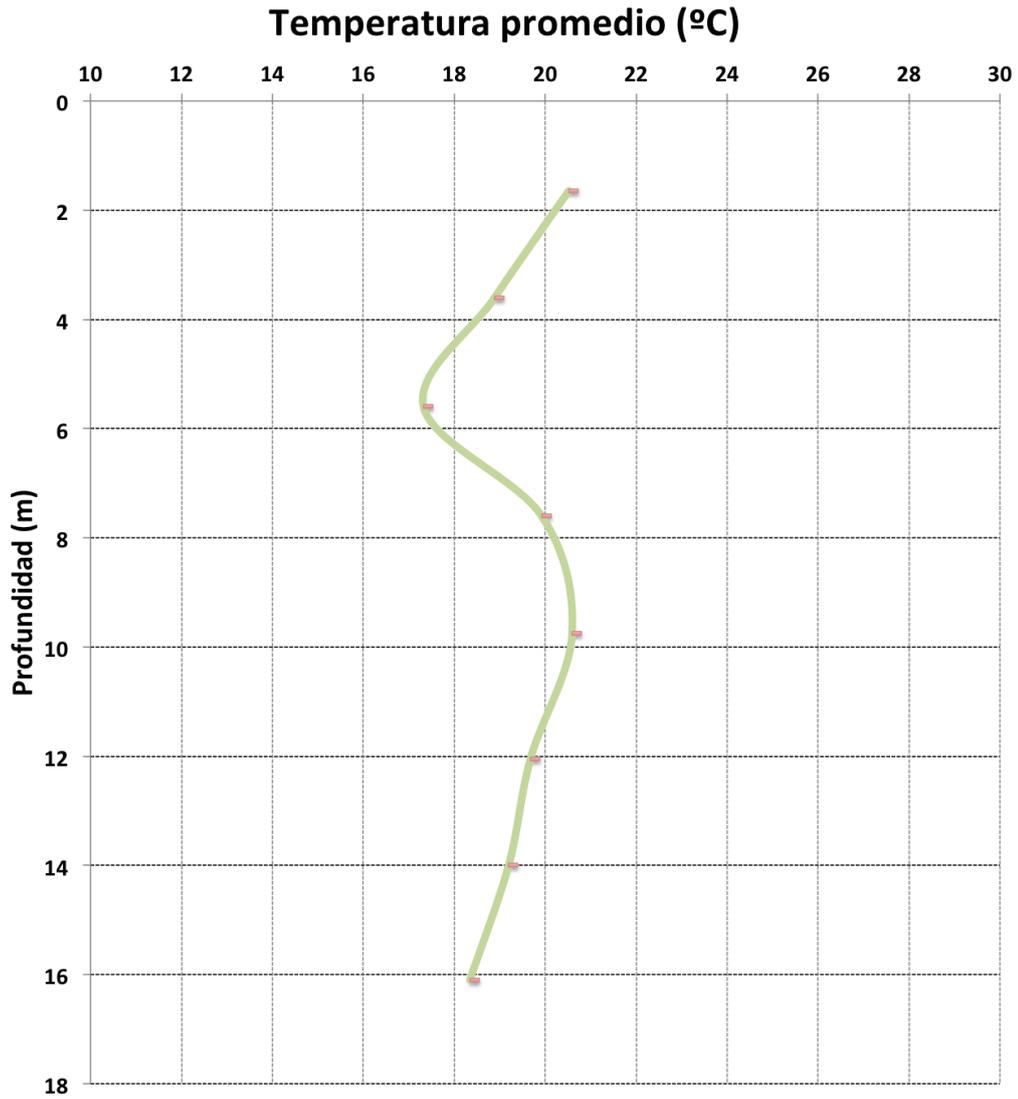


Figura 3.20: Perfil térmico del pilote

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Estudiando cada sensor de manera independiente, se comprueba que la temperatura se mantiene estable (Figura 3.21).

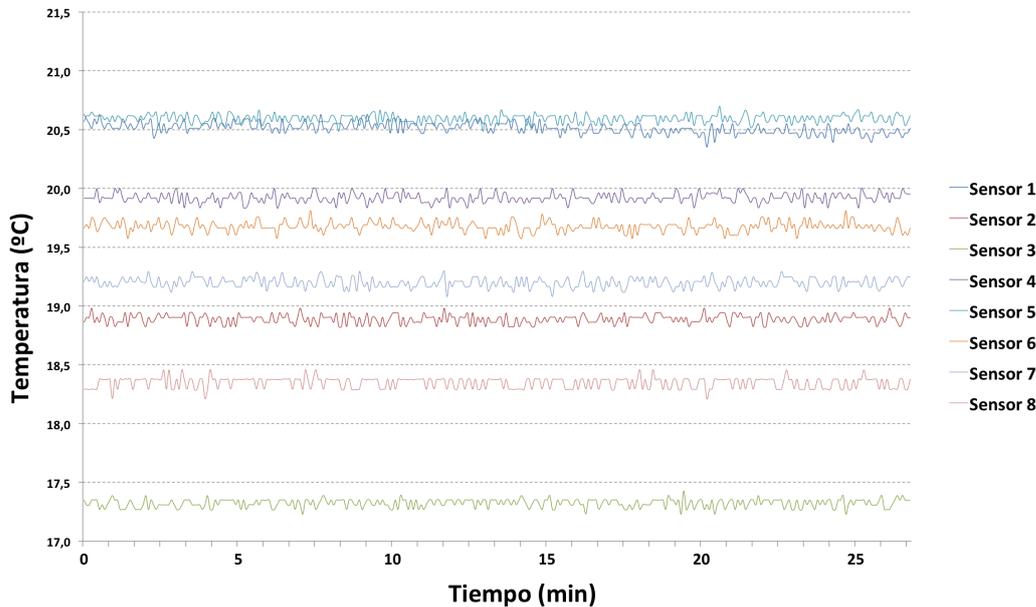


Figura 3.21: Variación de la temperatura con el tiempo

Una vez comprobado y registrado el perfil térmico del pilote, se inicia el ensayo siguiendo el protocolo descrito anteriormente.

3.4.3 Aplicación de las cargas térmicas

En primer lugar se generó un pulso térmico de potencia variable con el tiempo, tal como recoge el diagrama de la Figura 3.22. En cada escalón de potencia, se dejó el sistema estacionario hasta conseguir la estabilización térmica.

3.4.3.1 Primera fase: Saltos térmicos de potencia variable

En esta fase se obtuvo la variación de la temperatura el fluido en el interior pilote (obtenida como el promedio de la temperatura de entrada y la temperatura de salida) en función de la potencia de la inyección térmica inyectada.

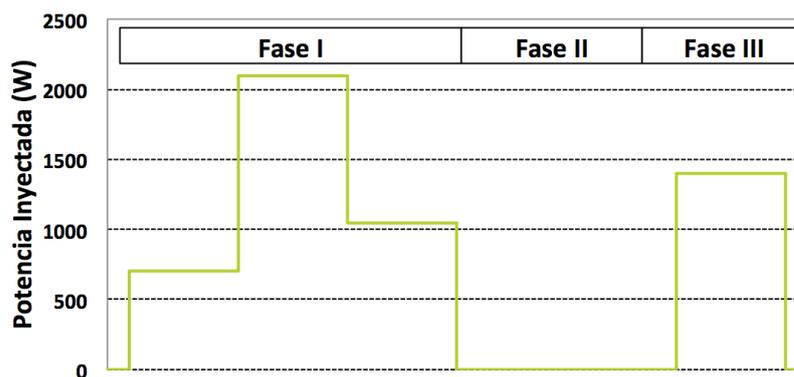


Figura 3.22: Variación de la potencia de inyección en el pilote

Las características de cada uno de los ensayos son las siguientes:

- **Ensayo 1:**
 - **Salto térmico:** 1 grado.
 - **Caudal:** 0,6 m³/h (10 l/min).
 - **Fluido:** Agua de red.
 - **Potencia inyectada:** 700 W.
 - **Ratio de potencia:** 40 W/m.
 - **Duración:** 5 días.
- **Ensayo 2:**
 - **Salto térmico:** 3 grados.
 - **Caudal:** 0,6 m³/h (10 l/min).
 - **Fluido:** Agua de red.
 - **Potencia inyectada:** 2.100 W.
 - **Ratio de potencia:** 120 W/m.
 - **Duración:** 5 días.
- **Ensayo 3:**
 - **Salto térmico:** 1,5 grados.
 - **Caudal:** 0,6 m³/h (10 l/min).
 - **Fluido:** Agua de red.
 - **Potencia inyectada:** 1.050 W.
 - **Ratio de potencia:** 60 W/m.
 - **Duración:** 5 días.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Los resultados de todos los ensayos puede observarse en la Figura 3.23.

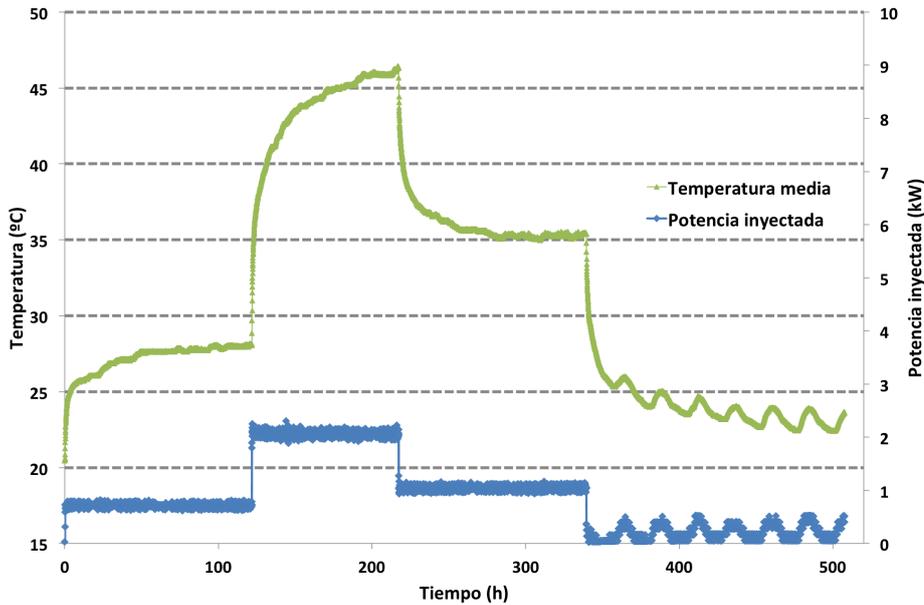


Figura 3.23: Registro de datos de la instalación térmica durante la Fase I

3.4.3.2 Segunda fase: Recuperación del terreno

Una vez finalizada la primera fase de inyección térmica a diferentes potencias, se circuló agua de manera continuada por el interior del pilote durante 10 días, con el objetivo de volver al mismo perfil térmico que al inicio de los ensayos. Los datos obtenidos se pueden observar en la Figura 3.24.

Tal y como se observa en la gráfica, en los primeros diez metros de profundidad hay una variación respecto al inicio del ensayo anterior debida a afección por la temperatura ambiente (el segundo ensayo comenzó unas semanas con mayor temperatura). Pero se puede notar que a partir de dichos diez metros coincide la temperatura en el pilote en ambos ensayos, por lo que podemos comprobar que el terreno se encuentra ya sin la alteración térmica producida en el anterior ensayo.

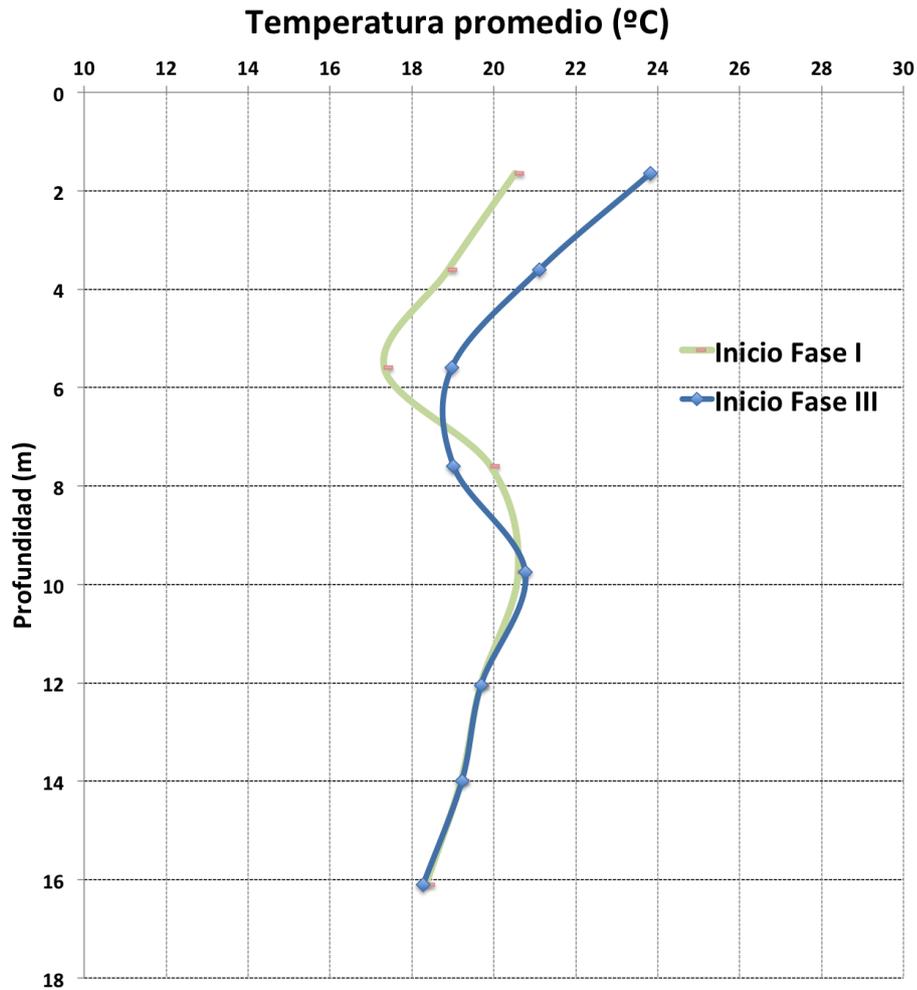


Figura 3.24: Perfil térmico del terreno antes de cada uno de los ensayos

3.4.3.3 Tercera fase: Salto térmico a diferente potencia

Para finalizar, se inyectó un potencia diferente a la del ensayo anterior, partiendo del mismo perfil térmico del terreno.

Las características del ensayo son las siguientes:

- **Salto térmico:** 2 grados.
- **Caudal:** 0,6 m³/h (10 l/min).
- **Fluido:** Agua de red.

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Potencia inyectada:** 1.400 W.
- **Ratio de potencia:** 80 W/m.
- **Duración:** 6 días.

Los resultados pueden observarse en Figura 3.25.

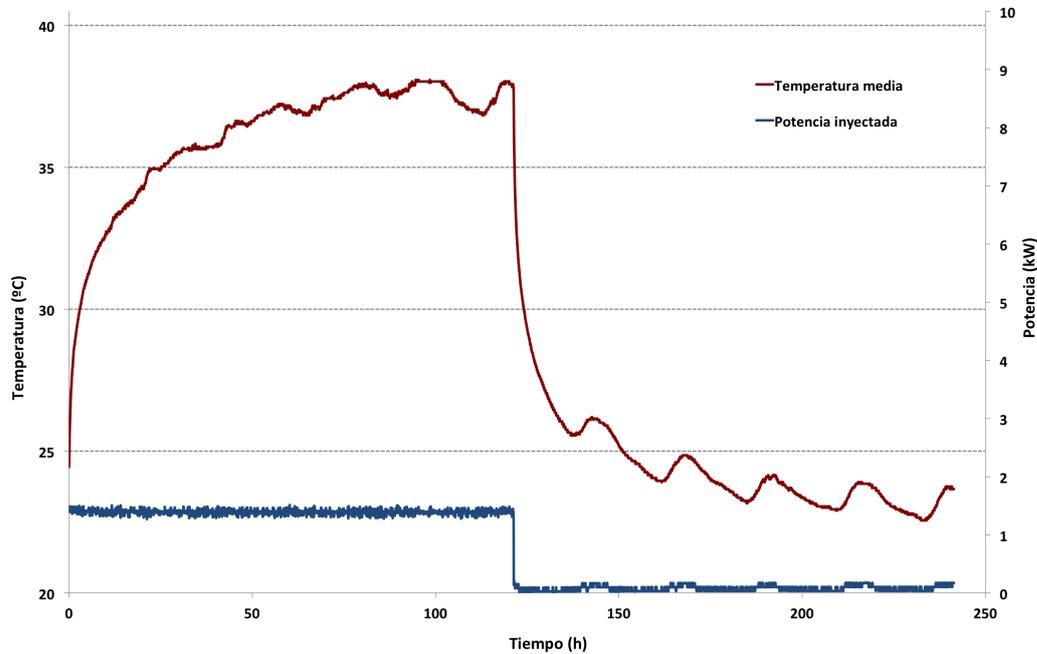


Figura 3.25: Registro de datos de la instalación térmica durante la Fase III

3.5 Interpretación de los resultados

Una vez realizado los ensayos programados, se realiza el tratamiento de los datos registrados con dos objetivos:

- El cálculo experimental de la resistencia térmica del pilote, mediante una aproximación lineal de los datos obtenidos. Para ello se utilizarán los datos pertenecientes a los dos inyecciones de calor a diferentes potencias, partiendo ambas del suelo sin alterar. Estos cálculos están desarrollados en el apartado 3.5.1.

- El ajuste de parámetros mediante TRNSYS para adaptar la curva obtenida en la primera parte de los ensayos (inyección térmica a tres potencias diferentes) con los predicciones calculadas mediante el programa TRNSYS. Este punto vendrá detallado en el apartado 3.5.2.

3.5.1 Cálculo experimental de la resistencia térmica del pilote

A partir del desarrollo matemático realizado en el apartado 2.1, podemos ajustar la ecuación de la transferencia de calor en el pilote a la ecuación de una recta, tal como describe la ecuación 2.15.

Por lo tanto, tendríamos:

$$T_f(t) = k \cdot x(t) + m \quad (3.1a)$$

Siendo k la pendiente de la curva, que relaciona la conductividad térmica del terreno según la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{4\pi\lambda} \quad (3.1b)$$

Y m es la ordenada en el origen, que corresponde al valor cuando el tiempo es igual a 0. Considerando la resistencia térmica un valor constante en el tiempo:

$$m = T_0 + R_b Q_z \quad (3.1c)$$

Y el termino dependiente del tiempo:

$$x(t) = Q_z \left(\ln \left(\frac{t}{t_0} \right) - \gamma \right) \quad \text{siendo } t_0 = \frac{r_0^2}{4\alpha} \quad (3.1d)$$

Los ensayos realizados, tal como se ha descrito en el apartado 3.4 han sido dos inyecciones de calor, partiendo del terreno sin alterar, de las siguientes características:

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Las características del ensayo son las siguientes:

- **Ensayo 1:**
 - **Salto térmico:** 1 grado.
 - **Caudal:** 0,6 m³/h (10 l/min).
 - **Fluido:** Agua de red.
 - **Potencia inyectada:** 700 W.
 - **Ratio de potencia:** 40 W/m.
 - **Duración:** 5 días.
- **Ensayo 2:**
 - **Salto térmico:** 2 grados.
 - **Caudal:** 0,6 m³/h (10 l/min).
 - **Fluido:** Agua de red.
 - **Potencia inyectada:** 1.400 W
 - **Ratio de potencia:** 80 W/m.
 - **Duración:** 6 días.

Los datos obtenidos en los ensayos pueden observarse en la Figura 3.26.

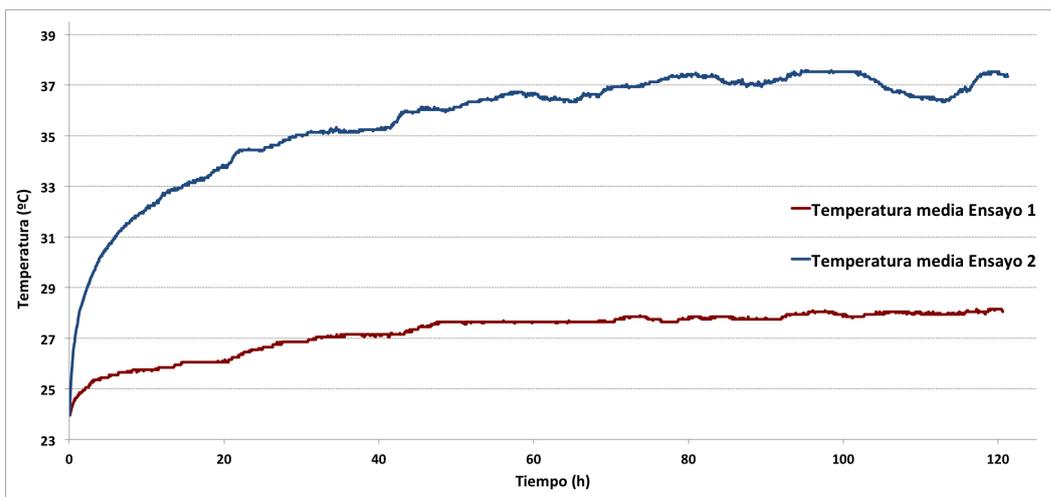


Figura 3.26: Registro de datos de la instalación térmica durante los dos ensayos

3.5 Interpretación de los resultados

Realizando el ajuste determinado por la ecuación 3.1, utilizando los siguientes parámetros, obtenemos la gráfica descrita en la Figura 3.27:

$$\alpha = 0,0000006 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$r_{beq} = 0,197 \text{ [m]}$$

$$\gamma = 0,57721$$

$$Q_{z_1} = 41,09 \pm 2,01 \text{ \% [W/m]}$$

$$Q_{z_2} = 79,93 \pm 1,66 \text{ \% [W/m]}$$

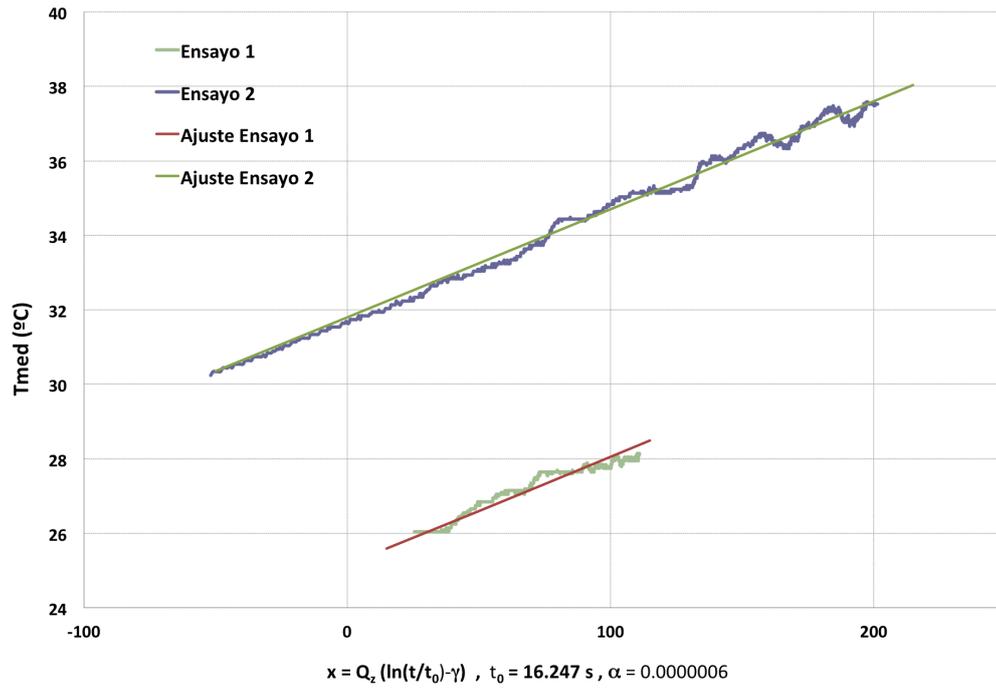


Figura 3.27: Aproximación de la temperatura media en el pilote a la ecuación de una recta

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Por lo tanto, obtenemos:

$$\text{Ensayo 1: } 0,029 \cdot x + 31,7$$

$$\text{Ensayo 2: } 0,029 \cdot x + 25,3$$

Nótese que en ambas ecuaciones, la pendiente de la recta es la misma, al depender únicamente de la conductividad del terreno, que en ambos casos es la misma.

Por tanto, de la ecuación 3.1b, tenemos:

$$k = \frac{1}{4\pi\lambda} = 0,029 \Rightarrow \lambda = 2,7 \pm 1,88 \% \text{ W/(mK)} \quad (3.2)$$

Y de ecuación 3.1c, al ser T_0 iguales en ambos ensayos, al partir de terreno sin afección térmica:

$$m_1 = T_0 + R_b Q_{z_1} \quad (3.3a)$$

$$m_2 = T_0 + R_b Q_{z_2} \quad (3.3b)$$

$$m_1 - m_2 = R_b \Delta Q_z \quad (3.3c)$$

En nuestro caso, tenemos:

$$31,791 - 25,323 = 6,468 = R_b (79,93 - 41,09) \Rightarrow R_b = 0,16 \pm 1,88 \% \text{ mK/W} \quad (3.4)$$

3.5.2 Ajuste de parámetros mediante TRNSYS

Finalmente se realizó una simulación mediante TRNSYS con los parámetros calculados en el apartado 3.5.1 (Figura 3.28).

Los parámetros de entrada utilizados en la simulación son los siguientes:

$$\text{Volumen de almacenamiento} = 2.000 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Profundidad del intercambiador} = 17,4 \text{ [m]}$$

$$\text{Número de intercambiadores} = 1$$

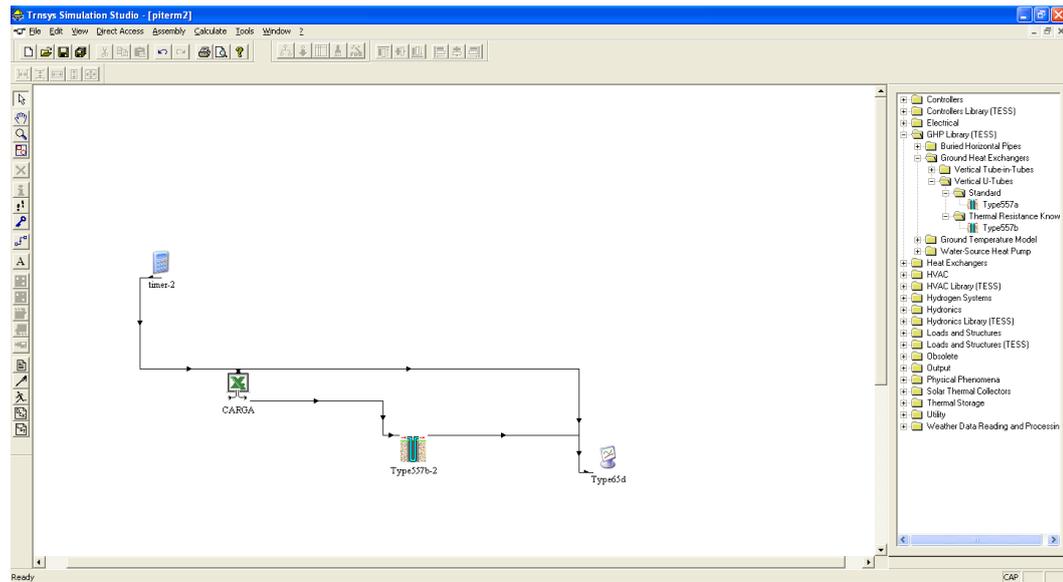


Figura 3.28: Simulación mediante TRSYS

Conductividad térmica del terreno (λ) = 2,7 [W/(m.K)]

Capacidad térmica = 2.222 [kJ/(m³K)]

r_{beq} = 0,197 [m]

Resistencia térmica = 0,16 [mK/W] = 0,044 [m.K.hr./kJ]

Capacidad térmica del fluido = 4,18 [kJ/kg.K]

Densidad del fluido = 1.000 [kg/ m³]

Temperatura inicial de la superficie = 18 [° C]

Temperatura media del terreno = 20 [° C]

A partir de los datos registrados de la temperatura de entrada, se simuló mediante TRNSYS el comportamiento térmico del pilote termoactivo, calculando la temperatura de salida, obteniéndose la gráfica de la Figura 3.29.

La Figura 3.30, Figura 3.31 y Figura 3.32 presentan un detalle de la gráfica de la Figura 3.29 en su parte inicial, intermedia y final, respectivamente.

Puede observarse en el detalle de la Figura 3.31, que la temperatura real es menor que la temperatura calculada por el TRNSYS. Eso puede ser debido a un incremento de la conductividad con la potencia, causa principal de la presencia de aguas subterráneas en el terreno. Al aumentar la temperatura del terreno, y por tanto,

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

aumentar la temperatura de dichas aguas, favorece su circulación, y por tanto, aumenta la conductividad en el terreno.

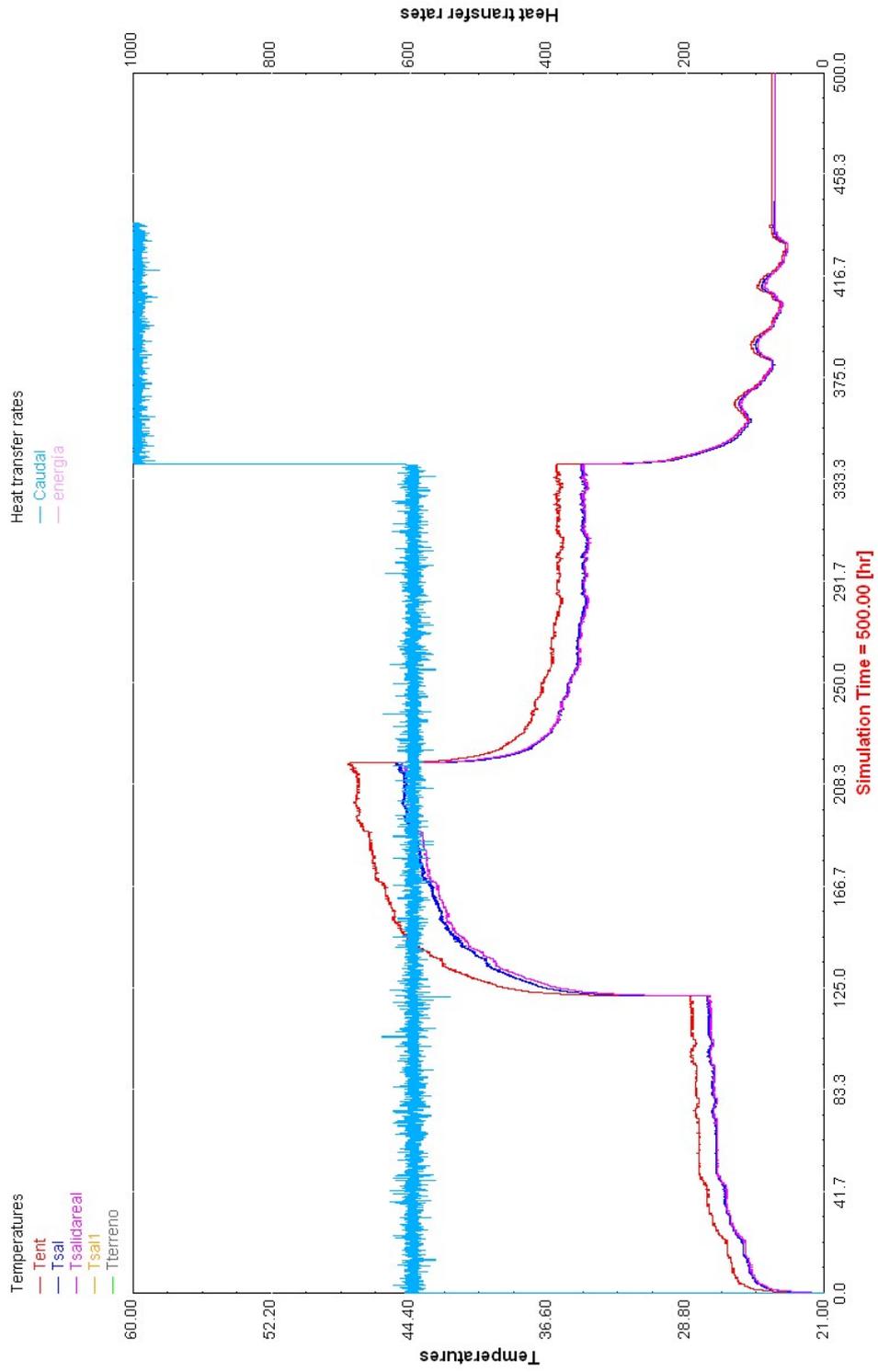


Figura 3.29: Salida de la simulación mediante TRNSYS. Se puede comparar la temperatura de salida calculada (azul) frente a la real (morada)

3. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

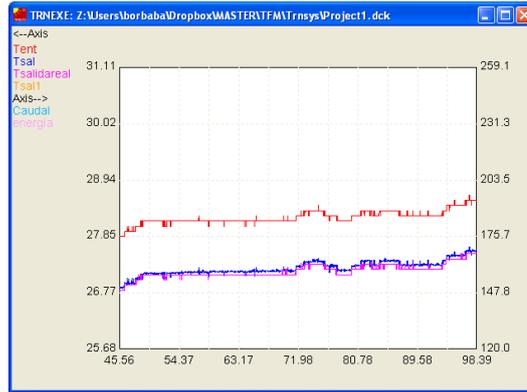


Figura 3.30: Detalle salida de la simulación mediante TRNSYS

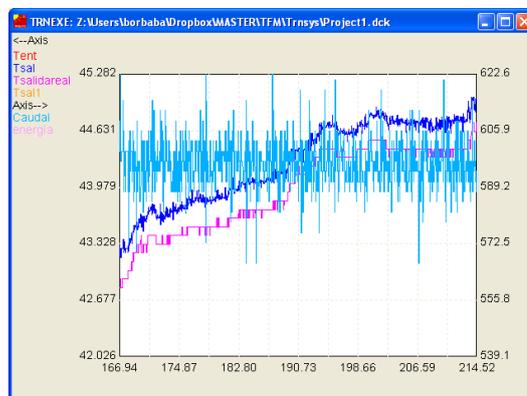


Figura 3.31: Detalle salida de la simulación mediante TRNSYS



Figura 3.32: Detalle salida de la simulación mediante TRNSYS

Now this is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is, perhaps, the end of the beginning.

Winston Churchill

CAPÍTULO

4

Conclusiones

En este Trabajo Fin de Master, se han abordado diferentes aspectos relacionados con las estructuras termoactivas, más concretamente, el desarrollo del comportamiento térmico de un pilote termoactivo.

En primer lugar, se realizó un estudio detallado, junto con una revisión minuciosa del estado del arte, de cada uno de los aspectos tratados en el trabajo. Se han detallado las ecuaciones que describen el comportamiento térmico en un pilote termoactivo durante su intercambio de calor con el terreno. También se ha justificado la caracterización térmica de un pilote termoactivo mediante su resistencia térmica.

En segundo lugar, se ha descrito la construcción y ejecución del pilote experimental sobre el que se han realizado las pruebas térmicas. Se ha detallado la instrumentación instalada en el interior del pilote, explicado el proceso de hinca y su activación térmica.

Se ha desarrollado el protocolo de ensayos realizados en el pilote, explicando sus objetivos y cómo se alcanzarían.

Por último, se han expuesto los resultados de los ensayos térmicos y se ha presentado una metodología para el cálculo experimental de la resistencia térmica del

4. CONCLUSIONES

pilote. Para poder validar dicho cálculo se ha realizado una simulación mediante TRNSYS del comportamiento térmico del pilote en las mismas condiciones, comprobando que ambas soluciones coinciden. También puede observarse la influencia de la presencia de aguas subterráneas en el terreno.

El trabajo expuesto presenta líneas de investigación que se podrían desarrollar a partir de la Trabajo Fin de Máster aquí presentado. Estos trabajos futuros se describen de forma resumida en el siguiente apartado.

4.1 Trabajos futuros

Un trabajo de investigación como el que aquí se presenta, destinado a ofrecer aportaciones sobre el comportamiento térmico de un pilote termoactivo, podría no tener fin, ya que cualquiera de los aspectos desarrollados en Trabajo Fin de Máster siempre podría ser susceptible a un estudio con mayor profundidad.

En este trabajo, los esfuerzos de investigación se han concentrado en desarrollar un modelado matemático que describiera el comportamiento térmico de un pilote termoactivo, que permitiera realizar un cálculo experimental de la resistencia térmica del pilote, habiéndose reservado para trabajos futuros una serie de aspectos que se comentan seguidamente:

- Modelado matemático de mayor profundidad del comportamiento térmico del pilote, teniendo en cuenta su geometría, su topología de intercambiador de calor, su longitud finita y otros aspectos que fueron aproximados.
- A partir de las ecuaciones físicas que lo describen, y su resolución por métodos numéricos, como por ejemplo, diferencias finitas.
- Estudio de las sondas situadas en la cabecera del pilote, con el objeto de profundizar en el filtrado de las perturbaciones debidas a las condiciones exteriores.
- Filtrado de los datos y análisis de la conductividad térmica del terreno en función de cada tramo.
- Caracterizar el comportamiento térmico del pilote termoactivo mediante la 'función g', que representa el factor de respuesta térmica de la estructura

para un pulso de calor dado. Después se implementará el modelo obtenido en un paquete de simulación en TRNSYS.

Bibliografía

- [BMdCU13] Borja Badenes, Álvaro Montero, Pedro Fernández de Córdoba, and Javier F. Urchueguía. Climatización mediante bomba de calor geotérmica en el área mediterránea: fundamentos y nuevos desarrollos. Poster - XXXIV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física, Julio 2013. 1
- [Car59] Jaeger Carlslaw. *Conduction of heat in solids*. 1959. 28
- [dGdSP⁺13] María de Groot, Cristina de Santiago, Fernando Pardo, José Luis Arcos, Francisco Martín, Javier F. Urchueguía, and Borja Badenes. Heating and cooling an energy pile under working load in valencia. European Geothermal Congress (EGC). Pisa (Italy), 2013. 37
- [Esk87] P. Eskilson. *Thermal Analyses of Heat Extraction Boreholes*. 1987. 32
- [Hel91] G. Hellström. *GROUND HEAT STORAGE, Thermal Analyses of Duct Storage System*. PhD thesis, Lund University (LTH), 1991. 34
- [Mog83] P. Mogensen. *Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. The international Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*. 1983. 28
- [MUM⁺13] Álvaro Montero, Javier F. Urchueguía, Julio Martos, Borja Badenes, and Miguel Á. Picard. Ground temperature profile while thermal response testing. European Geothermal Congress (EGC). Pisa (Italy), 2013. 31

BIBLIOGRAFÍA

- [SIA05] *Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderer erdberührten Betonbauteilen – Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb.* SIA. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2005. 19