
Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Matemáticas



COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO DE PILOTES PREFABRICADOS

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

María De Groot Viana

Dirigida por:

Cristina de Santiago Buey

Fernando Pardo de Santayana Carrillo

Javier F. Urchueguía Schölzel

Valencia, Julio 2017

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que han contribuido en todo el proceso de elaboración de esta tesis y sin los cuales este proyecto hubiese sido imposible.

En primer lugar, a mis directores de tesis: Cristina de Santiago, Fernando Pardo y Javier Urchueguía. Me han ayudado a plantear, realizar y finalizar la tesis. Sus consejos y correcciones han sido de gran ayuda. Quiero destacar los impulsos y ánimos que siempre me han dado para continuar, cuando la meta se veía lejos, llegando así a presentarla con éxito. El mérito de esta tesis es en gran medida vuestra, gracias.

Al laboratorio de geotecnia que me facilitó una beca para realizar esta tesis durante 4 años y a todas las personas del laboratorio que han contribuido en ella a través de los ensayos de campo, en el propio laboratorio o con sus consejos: José Estaire, Herminia, Toledo, Clemente, Josito, Pedro, Felipe, Pedro Juan, Amores, Manuel Pintado y aunque no siendo personal del CEDEX ha compartido con nosotros todos los sufrimientos de la instrumentación, Manolo Lombardo.

Todos los datos de esta tesis han sido obtenidos gracias a la financiación del programa INNPACTO 2011, del Ministerio de Economía y Competitividad, sin esta ayuda económica hubiese sido imposible el diseño, la instrumentación y la construcción del pilote.

Mención especial a todas las empresas que han colaborado en este proyecto a parte del CEDEX: Rodio Kronsa, Energesis y Universidad Politécnica de Valencia.

Francisco Martín y Borja Badenes por su ayuda en sus áreas de conocimiento para que la construcción y el ensayo resultase satisfactorio.

A mis compañeros de comida y risas por sus elocuentes consejos acerca de la tesis y de la vida en general que me acompañaron los 4 años en el laboratorio: David Muñoz, Antonio Prado, Mauro Muñoz, Ángel Tijera, Rubén Ruiz, Rebeca Hinojal y Elena de la Maza.

A mis padres por enseñarme que todo sacrificio al final tendrá su recompensa, por su amor incondicional y su apoyo moral en todo momento.

A mi marido, Jorge, por comprenderme, ayudarme, y aunque me ha escuchado hablar de esta tesis demasiadas veces, siempre ha tenido una palabra de ánimo; sin tu apoyo esto hubiese sido imposible.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
RESUM	5
I INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
I.1 INTRODUCCIÓN.....	9
I.2 OBJETIVOS.....	11
I.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	12
II CONCEPTOS BÁSICOS	17
II.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE PILOTES	17
II.1.1 Definición. Cargas de un pilote	17
II.1.2 Tipos de pilotes	18
II.1.3 Carga de hundimiento de un pilote aislado	21
II.1.4 Cálculo de pilotes	32
II.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE GEOTERMIA	41
II.2.1 Origen del calor en el terreno.....	41
II.2.2 Clasificación: Tipos de geotermia y tipos de yacimientos	42
II.2.3 Tipos de aplicaciones	45
II.2.4 Sistemas de intercambiadores de calor.....	46
II.2.5 El hormigón como elemento intercambiador de calor.....	50
II.3 CONCEPTOS DE INSTRUMENTACIÓN.....	60
II.3.1 Medidas de desplazamiento	60
II.3.2 Medidas de deformaciones	63
II.3.3 Medidas de Fuerza	65
II.3.4 Medida de temperatura	68
II.3.5 Equipo multiparamétrico YSI ProPlus.....	69
II.3.6 Sensores de fibra óptica para medida de deformación y temperatura.....	70
III ESTADO DEL CONOCIMIENTO	77
III.1 ANTECEDENTES.....	77
III.2 EXPERIENCIAS EN DIFERENTES PAÍSES	77

III.2.1	<i>Pilotes geotérmicos en Austria</i>	77
III.2.2	<i>Pilotes geotérmicos en Suiza</i>	81
III.2.3	<i>Pilotes geotérmicos en Inglaterra</i>	86
III.2.4	<i>Pilotes geotérmicos en Estados Unidos</i>	94
III.3	SÍNTESIS DE CONOCIMIENTOS ACTUALES	100
III.3.1	<i>Deducciones experimentales</i>	101
III.3.2	<i>Un modelo de comportamiento termo-mecánico de pilotes</i>	103
III.4	NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN	107

IV PLANIFICACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO 113

IV.1	INTRODUCCIÓN	113
IV.2	SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO	114
IV.2.1	<i>Selección del emplazamiento</i>	114
IV.2.2	<i>Marco geológico del emplazamiento seleccionado</i>	114
IV.2.3	<i>Sondeo mecánico</i>	116
IV.2.4	<i>Prueba de penetración dinámica superpesada</i>	118
IV.2.5	<i>Ensayos de laboratorio</i>	120
IV.2.6	<i>Datos geotécnicos de informes de localizaciones cercanas</i>	130
IV.3	DISEÑO DEL ENSAYO	132
IV.3.1	<i>Diseño del pilote</i>	132
IV.3.2	<i>Diseño del ensayo: Solicitaciones térmicas</i>	135
IV.3.3	<i>Diseño del ensayo: Solicitud mecánica</i>	141
IV.4	CONSTRUCCIÓN DEL PILOTE	145
IV.5	INSTRUMENTACIÓN INTERNA DEL PILOTE	148
IV.5.1	<i>Extensómetros de cuerda vibrante</i>	149
IV.5.2	<i>Galgas extensométricas</i>	151
IV.5.3	<i>Sensores de fibra óptica</i>	151
IV.5.4	<i>Colocación de los sensores en el interior del pilote</i>	155
IV.6	HINCADO DEL PILOTE	157
IV.7	PRUEBA DE CARGA DINÁMICA	162
IV.7.1	<i>Método CASE</i>	165
IV.7.2	<i>Análisis CAPWAP</i>	169
IV.8	ACTIVACIÓN TÉRMICA DEL PILOTE	172
IV.8.1	<i>Introducción de la sonda</i>	172
IV.8.2	<i>Prueba de estanqueidad</i>	173
IV.8.3	<i>Inyección del mortero de alta conductividad térmica</i>	173
IV.8.4	<i>Prueba de presión final</i>	175
IV.9	MONTAJE DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGA MECÁNICA	175

IV.9.1	<i>Elementos del sistema de aplicación de carga mecánica</i>	176
IV.9.2	<i>Ejecución de los anclajes</i>	177
IV.9.3	<i>Montaje del castillete</i>	180
IV.9.4	<i>Tesado y comprobación de los anclajes</i>	180
IV.9.5	<i>Instalación del bastidor de reacción</i>	182
IV.10	MONTAJE DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS	185
IV.10.1	<i>Instalación térmica</i>	186
IV.10.2	<i>Sistema de conexión con el pilote</i>	187
IV.11	INSTRUMENTACIÓN EXTERNA DEL PILOTE	187
V	COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL PILOTE	192
IV.1	TRANSFERENCIA DE CALOR Y PARÁMETROS TÉRMICOS ...	193
IV.1.1	<i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	193
IV.1.2	<i>Definición de los parámetros térmicos básicos</i>	197
IV.2	MODELADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS	199
IV.2.1	<i>Planteamiento del modelo</i>	200
IV.2.2	<i>El momento C_0</i>	204
IV.2.3	<i>El momento C_a</i>	205
IV.2.4	<i>El momento C_b</i>	206
IV.2.5	<i>El momento C_c</i>	207
IV.2.6	<i>El momento C_d</i>	208
IV.2.7	<i>El momento C_e</i>	209
IV.2.8	<i>Influencia térmica del pilote en el terreno</i>	210
IV.3	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA PILOTE-TERRENO	212
IV.3.1	<i>Aproximación mediante el modelo de la fuente de calor lineal infinita</i>	213
IV.3.2	<i>Aplicación del modelo numérico al ensayo de respuesta térmica del pilote</i>	216
IV.3.3	<i>Determinación experimental</i>	218
V	RESULTADOS	227
V.1	INTRODUCCIÓN	227
V.2	TRATAMIENTO DE LOS DATOS	228
V.2.1	<i>Datos brutos: Tipos de deformación en el pilote</i>	228
V.2.2	<i>Criterio de signos convenido</i>	230
V.2.3	<i>Nomenclatura de los ensayos y puntos de ensayo específicos</i>	230
V.3	PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA: ENSAYOS A Y B	231
V.3.1	<i>Primera prueba de carga estática. ENSAYO A</i>	231
V.3.2	<i>Segunda prueba de carga estática. ENSAYO B</i>	243
V.4	ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DEL PILOTE: ENSAYO C .	251
V.4.1	<i>TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL INTERIOR DEL PILOTE</i>	252
V.4.2	<i>MOVIMIENTOS MEDIDOS EN LA CABEZA DEL PILOTE</i>	254

V.4.3	DEFORMACIONES MEDIDAS EN EL INTERIOR DEL PILOTE	256
V.4.4	TENSIONES EN EL INTERIOR DEL PILOTE	259
V.4.5	CARGAS AXILES EN EL PILOTE	264
V.5	PRUEBA DE SIMULACIÓN DE CARGAS DIARIAS: ENSAYO E	267
V.5.1	Resultados del ciclo 2.....	269
V.5.2	Resultados del ensayo E completo.....	283
VI	ANALISIS DE RESULTADOS	315
VI.1	INTRODUCCION.....	315
VI.2	PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA: ENSAYOS A Y B	316
VI.2.1	Primera prueba de carga estática. Ensayo A	316
VI.2.2	Segunda prueba de carga estática. Ensayo B	332
VI.3	ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL PILOTE: Ensayo C	345
VI.3.1	Temperaturas medidas en el interior del pilote	346
VI.3.2	Movimientos medidos en la cabeza del pilote	350
VI.3.3	Deformaciones medidas en el interior del pilote	351
VI.3.4	Tensiones en el interior del pilote	354
VI.3.5	Cargas axiles medidas en el interior del pilote	356
VI.3.6	Carga en la punta del pilote.....	358
VI.3.7	Tensión tangencial entre fuste y terreno	360
VI.4	PRUEBA DE SIMULACIÓN DE CARGAS DIARIAS: ENSAYO E	371
VI.4.1	ANALISIS DEL CICLO 2	371
VI.4.2	ANALISIS DEL ENSAYO E COMPLETO	385
VI.5	ANÁLISIS DE RESISTENCIA DEL PILOTE EN TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	397
VII	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	403
VII.1	CONCLUSIONES	403
VII.1.1	Sobre el comportamiento térmico del pilote:	406
VII.1.2	Sobre el comportamiento mecánico del pilote experimental:	407
VII.1.3	Sobre el comportamiento termo-mecánico del pilote:	408
VII.2	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	411
VIII	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	417
	ÍNDICE DE FIGURAS	423
	ÍNDICE DE TABLAS.....	430

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS LATINOS		Página
a_d	Valor de cálculo de los datos geométricos;	34
A	Área de la sección del pilote	103
A_f	Área del fuste	21
A_p	Área de la punta	21, 22, 28
B	Diámetro del pilote	22
C	Cohesión del terreno	22
c_u	Cohesión no drenada del terreno	24, 25, 131
C_a	Adherencia	25
C_{lim}	Valor límite para la misma situación de dimensionado que E_{ser}	36
C_1	Coeficiente de galga del hilo que mide deformación por temperatura (hilo 2) (0,796)	72
C_2	Coeficiente de dilatación térmica del hilo de fibra óptica (10,1 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)	72
C_v	Capacidad calorífica volumétrica	195
c	Capacidad calorífica específica	189
$CTEs$	Coeficiente de dilatación térmica de la estructura donde está montado el sensor (11 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)	72
D	Profundidad de la punta, medida dentro de la capa resistente y no desde la superficie del terreno.	23
D_c	Profundidad crítica	23
d_q	Coeficiente de profundidad	22
E	Módulo de elasticidad o de Young	60, 63, 103, 234, 253
E_d	Valor de cálculo del efecto de las acciones. Asentamiento de diseño del pilote	34, 37
E_{ser}	Efecto de las acciones para cada situación de dimensionado para la comprobación del estado límite de servicio	36
F	Coeficiente de seguridad total Fuerza aplicada en LVDT, extensómetros	21 60, 62
F_g	Coeficiente de galga del hilo que mide deformación sin corregir por temperatura (hilo 1), valor = 0,777.	71
F_{rep}	Valor representativo de las acciones que intervienen en la situación de dimensionado considerada	34
f	Frecuencia de vibración del hilo en extensómetro	62, 63

Grad h	Gradiente hidráulico	189
K	Coeficiente de permeabilidad	189
K_f	Coeficiente de empuje horizontal	24, 131
	Coeficiente de conversión del hilo (extensómetro)	62, 63
L	Coeficiente de autoinducción de una bobina en LVDT	60
L₀	Inductancia del núcleo dentro del solenoide en LVDT	60
l	Longitud del núcleo de hierro en LVDT	60
l₀	Longitud del núcleo dentro del solenoide en LVDT	60
l_{Fe}	Longitud del solenoide en LVDT	60
L_{Fe}	Inductancia del solenoide en LVDT	60
N	Número de espiras del solenoide en LVDT	60
N	Carga en el pilote	235
N_{térm}	Carga axial de origen térmico	103, 257
N_{mec}	Carga axial de origen mecánico	257
N_{térm+mec}	Carga axial de origen térmico + mecánico	257
Nz₁ y Nz₂	Cargas axiales correspondientes a las profundidades z ₁ y z ₂	321
N_q	Coeficiente de capacidad portante	22
N₃₀	Resistencia a la penetración en el ensayo estándar (SPT)	26
N_{SPT}	Valor medio de N ₃₀ a partir de la media de la zona activa inferior y de la media de zona pasiva superior.	131
n	Porosidad	190
q	Presión efectiva en el nivel de la punta del pilote	22
	Flujo de calor	188, 207
q_u	Resistencia a la compresión simple de las arcillas saturadas. Presión no drenada en la punta	24, 26, 28, 29, 30
Q_h	Carga de hundimiento de un pilote, Capacidad portante	21, 130
Q_F	Carga por fuste	24, 26, 28, 130, 131
Q_p	Carga soportada por punta	22, 26, 28, 130
q_p	Carga de hundimiento unitaria por punta	130
R	Resistencia de un termistor	67, 146
	Radio del anillo en LVDT	60
R_b	Resistencia térmica	209,
R_{c;d}	Resistencia de diseño a compresión del pilote (estado límite último)	37
R_{s;k}	Valor característico de resistencia por fuste (estado límite último)	37
R_{b;k}	Valor característico de resistencia por punta (estado límite último)	37
R_d	Valor de cálculo de la resistencia del terreno	34
R_p	Resistencia a la penetración del penetrómetro estático (CPT)	26, 28, 29, 30

r_p	Resistencia unitaria de la punta	21
r_f	Resistencia unitaria medida por el fuste	21, 24, 28, 29, 30
S	Sección del hilo en extensómetros	62
	Superficie del pilote	235
S₀	Sección del núcleo dentro del solenoide en LVDT	60
S_{Fe}	Sección del núcleo de hierro en LVDT	60
S_t	Sensibilidad del sensor a la temperatura (23,8 pm/°C)	72, 184
S_q	Coefficiente de forma	22
T	Temperatura	64, 68, 146
T_f	Temperatura del fluido intercambiador	215
T(z₂ - z₁)	Tensión tangencial media transmitida al terreno (kN/m ²) entre las profundidades z ₁ y z ₂ .	321
t	Espesor de la pared del anillo en LVDT	60
V	Velocidad de flujo	189
V_{ex}	Voltaje de salida en galgas extensométricas	66, 67
w	Anchura del anillo en LVDT	60
X_k	Valor característico de los materiales	34
z	Profundidades	321

SÍMBOLOS GRIEGOS		Página
α	Coeficiente de minoración en pilotes	28
	Coeficiente de dilatación térmica	103
	Difusividad térmica	193, 207, 208
α_1	Coeficiente de dilatación térmica del hilo del extensómetro de cuerda vibrante	72
α_{hilo}	(12,2 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$) Coeficiente de dilatación térmica del hilo del extensómetro,	250
β	Coeficiente dependiente de ϕ	24
γ	Peso específico del hilo en extensómetro	
γ	Constante de Euler ($\gamma = 0,5772$)	208
γ_b	Coeficiente de seguridad parcial de la punta	37
γ_R	Coeficiente parcial para la resistencia frente al hundimiento	34, 36
γ_E	Coeficiente parcial para el efecto de las acciones	34, 36
γ_F	Coeficiente parcial para las acciones	34, 36
γ_M	Coeficiente parcial para las propiedades de los materiales	34, 36

γ_s	Coeficiente de seguridad parcial del fuste	37
$\gamma_{s,t}$	Coeficiente de seguridad parcial del fuste en pilotes a tracción	37
γ_t	Coeficiente de seguridad parcial total combinada en pilotes a compresión	37
ε	Deformaciones en el pilote	235
ε_T	Deformación axial de origen térmico	103
ε_{ap}	Deformación aparente: Deformación bruta medida por el hilo 1 del sensor de fibra óptica.	71
ε_{obs}	Deformación observada	221
ε_{tL}	Deformación térmica libre: Deformación debida a la temperatura que sufriría el elemento estructural si estuviese libre.	71, 221
ε_2	Deformación por cambio en el índice de refracción en el hilo 2	72
$\varepsilon_{no\ desarrollado}$	Deformación térmica no desarrollada: la parte de deformación térmica libre que no se produce debido a las constricciones impuestas por el terreno a lo largo del fuste y la punta, impidiendo desarrollar esta deformación en su totalidad.	71, 221, 251
δ	Desplazamiento en LVDT	60, 281, 282, 283
ϕ	Ángulo de rozamiento interno del terreno	22, 24, 131
ϕ_u	Ángulo de rozamiento interno no drenado del terreno	23, 24
μ_0	Permeabilidad magnética en el núcleo de aire o entrehierro en LVDT	
μ_r	Permeabilidad magnética en el núcleo de hierro en LVDT	60
ν	Módulo de Poisson	
ρ	Densidad	189
ρ_c	Capacidad calorífica volumétrica	190
λ	Conductividad térmica	188, 207, 208
λ	Longitud de onda en fibra óptica a una temperatura dada	184
λ_0	Longitud de onda inicial en fibra óptica	69, 71, 184
θ	Ángulo de incidencia de haz en fibra óptica	69
ε	Deformación	
τ_f	Resistencia unitaria por fuste al nivel considerado.	131
σ	Tensión en el pilote	234, 235
σ_{term}	Tensión en el pilote de origen térmico	253
σ_{mec}	Tensión en el pilote de origen mecánico	253
$\sigma_{term+mec}$	Tensión en el pilote de origen térmico + mecánico	253
σ'_z	Presión vertical efectiva, en un punto determinado	24, 131

RESUMEN

En el contexto de la necesidad presente de reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles - que definen la realidad energética actual -, la sociedad española necesita de la intensificación del uso de las energías renovables y del fomento de la eficiencia energética en todos los ámbitos. La geotermia, energía almacenada en forma de calor bajo la superficie del terreno, se configura como una fuente de energía renovable, limpia y respetuosa con el medio ambiente y que ya representa una alternativa de uso extendido en otros países de Europa. De especial interés para la Ingeniería son las instalaciones de aprovechamiento térmico mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, asociadas a elementos estructurales como muros-pantalla, losas o, como el caso de la presente tesis, pilotes termoactivos. Aprovechando la elevada capacidad de transferencia térmica del hormigón, este tipo de instalaciones – en la confluencia de la Geotecnia y de la Geotermia - están todavía relativamente poco extendidas, ya que faltan códigos de uso y diseño que permitan su generalización y estandarización en el mundo de la construcción. En este sentido, la condición más crucial que debe garantizarse es el cumplimiento simultáneo de dos condiciones: la función estructural y un rendimiento tecno-eficiente como elemento de intercambio de calor con el terreno. En el caso de los pilotes, debe verificarse que ni el comportamiento estructural del pilote ni su capacidad portante (resistencia por fuste y por punta; resistencia del terreno) se ven significativamente afectados por los ciclos de intercambio de calor con el terreno.

Tal compatibilidad en los objetivos de diseño requiere sin duda de un análisis más profundo, pues en los últimos años se han llevado a cabo algunos estudios que han analizado la relación entre las variaciones térmicas en el pilote y los cambios en la carga por fuste y por punta en el mismo, sugiriendo que la aplicación de cargas cíclicas de temperatura puede inducir modificaciones significativas en el sistema suelo-estructura, dando lugar a cargas adicionales que deben ser consideradas en el diseño de la cimentación termo-activa.

La presente tesis doctoral es consecuencia del desarrollo del proyecto PITERM (Caracterización termo-mecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termo-activos), dentro del subprograma INNPACTO 2011, del programa nacional de cooperación público-privada del Ministerio de Ciencia e Innovación. Este proyecto ha sido el primero que ha integrado en el análisis el efecto combinado de las acciones

mecánicas, geotécnicas y térmicas en el comportamiento de un pilote prefabricado hincado, activado térmicamente y completamente instrumentado. El proyecto se inició en septiembre de 2011 y se prolongó hasta diciembre de 2013.

El proyecto se orienta hacia el análisis del comportamiento de las cimentaciones termo-activas, el desarrollo de metodologías de diseño de estos elementos, en particular de los pilotes termoactivos, y su validación mediante datos experimentales.

El objetivo de este trabajo es validar, mediante una aproximación analítico-experimental, que los elementos objeto de estudio son capaces de hacer frente a las solicitaciones térmicas y mecánicas a las que se verá sometida a lo largo de su vida útil.

Más concretamente, en el proyecto se ha estudiado el comportamiento termomecánico de un pilote prefabricado y posteriormente hincado en Valencia, preparado para funcionar como elemento termoactivo, debidamente instrumentado. Con el registro e interpretación de los datos de las variables instrumentadas se ha evaluado el comportamiento del pilote sometido a solicitaciones mecánicas y térmicas semejantes a las que lo estaría en una obra real de edificación con aprovechamiento geotérmico.

Los resultados de esta tesis permiten entender y caracterizar el comportamiento mecánico de los pilotes y su respuesta ante diferentes solicitaciones térmicas en condiciones similares a las que tendrían en un edificio real. En este sentido, pretende ser una contribución a la extensión y popularización del uso de estos elementos en aras a aumentar nuestra capacidad de captar energía renovable del subsuelo de nuestras ciudades.

ABSTRACT

In our present urgency to reduce fossil fuel consumption, the Spanish society needs to accelerate the use of renewable energy sources and to intensify the adoption of stronger energy efficiency measures. Shallow Geothermal energy, stored in form of heat beneath the ground, a renewable and clean energy source, is one of such alternatives that, indeed evidences a wider deployment in other European countries. Of particular interest to engineering is the coupling of ground source heat pumps (GSHP) to structural elements such as walls-screen, slabs or, as the case of this thesis, thermo-active piles. This relatively innovative type of systems takes advantage of the high heat transfer rate of concrete, but its use is still limited by the absence of widely accepted standards and rules of design. In this sense, the most crucial requirement for this geo-structural heat transfer systems is that they must comply with a double function, namely to function efficiently as a structural as well as heat transfer element within the building environment. For this, it should be verified that neither the structural behaviour of the pile nor its bearing capacity (shaft resistance and tip, ground resistance) are significantly affected by the continuous heat exchange cycles between the building and the ground.

This question deserves a deeper analysis, for in recent years there has been research focused into the relationship between thermal variations in the pile and changes in the load shaft friction and the toe of the pile suggesting that the application of cyclic thermal loading can induce significant temperature-driven changes in the soil-structure system, leading to additional mechanical loads to be considered in the design.

This thesis follows the development of the PITERM project (Thermo-mechanical characterization and new design techniques of geothermal piles) within the Spanish INNPACTO 2011 program, a public-private cooperation funded by our Ministry of Science and Innovation. This project was the first to aim at a fully integrated analysis of the combined effect of mechanical and thermal actions upon a newly designed precast pile, thermally activated and fully instrumented. The project started in September 2011 and lasted until December 2013.

The overall goal of this project was to analyse the behaviour of thermo-active foundations in order to further develop-relevant design methodologies for these elements, to be validated by experimental data

By means of this combined analytic-experimental effort, we aim to validate the idea that foundations, designed appropriately, are able to cope with the thermal and mechanical stresses to which they ought to be subjected throughout its lifespan.

More specifically, the project has studied the thermomechanical behaviour of a prefabricated pile driven in Valencia, prepared to work as thermo-active element and properly instrumented. With the registration and interpretation of data from the instrumented it was possible to evaluate its behaviour under mechanical and thermal stresses similar to those that would exist in a real working scenario.

The results of this Thesis allow to understand and characterize the mechanical behaviour of geo-active piles and their response under different types of thermal cycling stresses under realistic conditions, contributing to the extension and dissemination of the use of this type of geo-structural elements, and, in the long run, aiming to increase our ability to harvest renewable heat out of the subsurface of our cities.

RESUM

En el context de la necessitat present de reduir nostra dependència dels combustibles fòssils - que definixen la realitat energètica actual -, la societat espanyola necessita de l'intensificació de l'ús de les energies renovellables i del foment de l'eficiència energètica en tots els àmbits. La geotèrmia, energia alma asenada en forma de calor baix la superfície del terreny, se configura com una font d'energia renovellable, neta i respectuosa en el mig ambient i que yag representa una alternativa d'us estés en atris països d'Europa. D'especial interés per a l'Ingeriria son les instal·lacions d'aprofitament tèrmic mediant l'ús de bombes de calor geotèrmiques, associades a elements estructurals com murs-pantalla, lloses o, com el cas del present TESIS, pilotes TERMOACTIVOS. Aprofitant l'elevada capacitat de transferència tèrmica del formigó, este tipo d'instal·lacions – en la confluència de la geotècnia i de la geotèrmia - estan encara relativament poc estesos, yag que falten codis d'us i disseny que permeten la seua rossegí i estandardització en el mon de la construcció. En este sentit, la condició mes crucial que deu garantir-se es el compliment simultani de dos condicions: la funció estructural i un rendiment tecno-eficient com element d'intercanvi de calor en el terreny. En el cas dels pilotes, deu verificar-se que ni el comportament estructural del pilote ni la seua capacitat portant (resistència per fust i per punta; resistència del terreny) se veuen significativament afectats pels cicles d'intercanvi de calor en el terreny.

Tal compatibilitat en els objectius de disseny requerix sense dubte d'un anàlisis mes profund, puix en els últims anys s'han portat a veta alguns estudis que han analista la relació entre les variacions tèrmiques en el pilote i els canvis en la carrega per fust i per punta en el mateix, suggerint que l'aplicació de carregues cícliques de temperatura pot induir modificacions significatives en el sistema sol-estructura, donant lloc a carregues addicionals que deuen ser considerades en el disseny de la fonamentació termo-actiu.

El present TESIS doctoral es conseqüència del desenrola del projecte PITERM (Caracterització termo-mecànic i noves tècniques de disseny de pilotes termo-actius), dins del SUBPROGRAMA INNPACTO 2011, del programa nacional de cooperació publica-privada del Ministeri de Ciència i Innovació. Este projecte ha segut el primer que ha integrat en la anàlisis l'efecte combinat de les accions mecàniques, geotécnicas i tèrmiques en el comportament d'un pilote prefabricat estacionat, activat

tèrmicament i completament instrumentat. El projecte s'inicià en setembre de 2011 i se prolongà fins desembre de 2013.

El projecte s'orienta cap al anàlisi del comportament de les fonamentacions termoactives, el desenrola de metodologies de disseny d'estos elements, en particular dels pilotes termoactives, i la seua validació mitjançant senyes experimentals.

L'objectiu d'este treball es validar, mitjançant una aproximació analítica-experimental, que els elements objecte d'estudi son capaços de fer front a les sol·licitacions tèrmiques i mecàniques a les que se vorà somes a lo llars de la seua vida útil.

Mes concretament, en el projecte s'ha estudiat el comportament termo-mecànic d'un pilote prefabricat i posteriorment estacionat en Valencia, preparat per a funcionar com element termoactiu, degudament instrumentat. En el registre i interpretació de les senyes de les variables instrumentades s'ha valorat el comportament del pilote somes a sol·licitacions mecàniques i tèrmiques semblants a les que ho estaria en una obra real d'edificació en aprofitament geotèrmic.

Els resultats d'esta tesis permeten entendre i caracteritzar el comportament mecànic dels pilotes i la seua resposta davant diferents sol·licitacions tèrmiques en condicions similars a les que tindrien en un edifici real. En este sentit, pretén ser una contribució a l'extensió i popularització de l'ús d'estos elements en ares a augmentar nostra capacitat de captar energia renovellable del subsòl de nostres ciutats.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

I.1 INTRODUCCIÓN

Con el nuevo siglo se imponen nuevas formas de aprovechamiento energético, nuevas formas de energía que permitan vivir sin dejar por ello de conservar nuestro planeta. Estas fuentes de energía son las energías renovables, que junto con el ahorro y la eficiencia energética se están convirtiendo en respuestas estratégicas a los importantes problemas planteados.

En este sentido, numerosos gobiernos acordaron en 1997 el **Protocolo de Kioto** sobre el cambio climático de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Este acuerdo, que entró en vigor en 2005 con la ratificación de 55 naciones, plantea el objetivo de reducir un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 durante el periodo 2008-2012. La **UE** aceptó el objetivo de un 8% de reducción en conjunto y para cumplirlo, aprobó el Plan de Acción 2005 –2007 de la estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética, el Plan de Energías Renovables 2005 –2010 y el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

Posteriormente, la Comisión Europea publicó en 2010 una comunicación conocida como “**Estrategia Europa 2020**” para que ayude a salir de la crisis y convierta a la UE en una economía inteligente, sostenible e integradora que disfrute de altos niveles de empleo, de productividad y de cohesión social. Entre los 5 objetivos que propone la Comisión en este documento, se encuentra el objetivo «**20/20/20**» en materia de clima y energía: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al menos en un 20% en comparación con los niveles de 1990, o en un 30% si se dan las condiciones al efecto, incrementar el porcentaje de las fuentes de energía renovables en el consumo final de energía hasta un 20% y en un 20% la eficacia energética. Por tanto, todas las tecnologías que contribuyan a disponer de una energía más limpia, diversificada y eficiente serán positivas para el sistema energético y la economía de Europa.

Dentro de estas nuevas alternativas aparece un gran desconocido: la **ENERGÍA GEOTÉRMICA**, definida como la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie del terreno (Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables).

La energía geotérmica somera, específicamente, es una energía térmica renovable que reduce la demanda eléctrica y cuenta con una gran capacidad de laminación de las puntas del consumo eléctrico, sin incidencia en el déficit tarifario, sin ocupación del suelo y con un impacto ambiental netamente positivo. La instalación de un sistema geotérmico de baja entalpía, normalmente asociado a una bomba de calor, implica una sustancial reducción de los costes de operación y mantenimiento frente a los sistemas convencionales de climatización. Permite proporcionar calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria con el mismo sistema y de manera ininterrumpida las 24 horas del día, 365 días al año. Por todo ello, la energía geotérmica somera puede contribuir significativamente al cumplimiento de los objetivos nacionales de generación con energías renovables, establecidos en la Directiva Europea de Energías Renovables como en el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE) 2008-2012.

Dentro de las tecnologías existentes de explotación geotérmica somera, las **cimentaciones energéticas o termo-activas** (pilotes, pantallas, túneles, anclajes) son estructuras de cimentación que permiten captar y disipar la energía térmica del terreno (VISION 2030 – GEOPLAT), cumpliendo así una doble funcionalidad: en primer lugar, como elementos estructurales, transmiten las cargas del edificio al terreno; en segundo lugar, como elementos termoactivos, intercambian calor con el suelo circundante. Entre ellos, los pilotes energéticos son posiblemente el tipo de cimentación termo-activa que se emplea actualmente con mayor profusión. Desde que aparecieran en Austria al principio de los años 80, este tipo de instalaciones se han ido incrementando hasta la actualidad (Brandl 2006).

En España, la climatización de espacios mediante pilotes termo-activos tiene un gran potencial, con el previsible desarrollo paralelo de una potente industria de captación energética y métodos de diseño de este tipo de pilotes. Los pilotes geotérmicos presentan una interacción pilote-terreno más compleja que los pilotes convencionales, debido fundamentalmente al efecto combinado de las cargas mecánicas y térmicas a las que se ve sometido el sistema, que pueden influir en el comportamiento del terreno y del pilote de forma simultánea. En este sentido, aunque ya existen diversas instalaciones de pilotes termo-activos, todavía existe una importante falta de conocimientos en los fenómenos de transferencia de calor y cargas entre pilote y terreno bajo la acción combinada de solicitaciones mecánicas y térmicas, en términos de restricciones de movimiento por punta, fuste y en cabeza, generación de tensiones y deformaciones internas de origen mecánico y térmico y cómo éstas afectan el estado tenso-deformacional del conjunto. El conocimiento de estos fenómenos permitiría

ajustar con criterio los coeficientes de seguridad geotécnicos de diseño sin disminuir la eficiencia energética del sistema geotérmico. Solo de esta forma se puede diseñar este tipo de pilotes con rigor, eficacia y eficiencia tanto geotécnica como geotérmica.

I.2 OBJETIVOS

El principal objetivo de esta tesis doctoral es estudiar el comportamiento termo-mecánico de un pilote prefabricado, debidamente instrumentado e hincado, preparado para funcionar como elemento termoactivo, bajo la acción simultánea de cargas mecánicas y térmicas controladas. Se pretende caracterizar el comportamiento geotécnico y termo-mecánico del pilote sometido a solicitaciones mecánicas y térmicas semejantes a las que sufriría en un edificio real con aprovechamiento geotérmico. Para ello, la profusa instrumentación interna y externa del pilote permitirá medir y registrar diferentes parámetros experimentales, para de esta forma poder evaluar el comportamiento del pilote.

Para ello, se ha definido una serie de objetivos específicos:

- **Recopilación bibliográfica** de experiencias en otros países con instalaciones de pilotes geotérmicos, así como los conocimientos adquiridos a partir de las mismas.
- **Diseño de la fase experimental** de la tesis en tres aspectos diferentes:
 - Diseño del pilote prefabricado para su construcción en escala real.
 - Diseño de la instrumentación interna y externa necesaria y adecuada para la toma de datos
 - Diseño de la aplicación de cargas térmicas y mecánicas: sistema de aplicación de cargas y ensayos apropiados
- **Fabricación e hincado del pilote** prefabricado y totalmente instrumentado.
- **Caracterización geotécnica del pilote** mediante ensayos de carga antes de someterlo a variaciones térmicas.
- **Caracterización térmica del pilote** mediante diversos ensayos térmicos, tanto en condiciones de potencia extrema como simulando condiciones reales.
- **Obtención, análisis e interpretación de los datos** obtenidos a partir de los múltiples sensores instalados. Estudio del comportamiento térmico y geotécnico del sistema pilote-terreno durante los diferentes ensayos realizados.

- A partir del análisis realizado en esta tesis, **valoración** de las necesidades específicas de diseño y ejecución de los pilotes termo-activos desde el punto de vista geotécnico y geotérmico.

I.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se estructura en los capítulos que se describen a continuación:

El **capítulo uno** es una introducción al tema de tesis que pretende centrar la atención sobre la existencia de los pilotes termo-activos y la necesidad de investigar sobre su comportamiento termo-geotécnico para avanzar en los métodos de diseño específicos de esta tecnología. Se establece un objetivo general y diversos objetivos específicos que pretenden ser alcanzados con la realización de esta tesis.

Dado el carácter novedoso y multidisciplinar de la tesis abordada, se detectó la necesidad de resumir fundamentos básicos de pilotes, geotermia e instrumentación que garanticen unos conocimientos básicos al lector suficientes para comprender esta tesis. Estos fundamentos se ofrecen en el **capítulo dos**.

El **capítulo tres** constituye un estado del conocimiento en pilotes termo-activos, realizado a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica.

El **capítulo cuatro** describe todas las fases del proyecto llevadas a cabo con el fin de obtener los datos con los que elaborar el estudio de esta tesis: Partiendo de una selección y caracterización del emplazamiento, se realizó a continuación el diseño del ensayo, en sus tres vertientes: diseño del pilote, diseño de las solicitaciones mecánicas y diseño de las solicitaciones térmicas que serán aplicadas al mismo para evaluar su comportamiento. El diseño de las solicitaciones, tanto térmicas como mecánicas, se describe en dos pasos: la descripción del sistema de aplicación de tales solicitaciones, que tuvo que ser definido a la medida del estudio propuesto, y secuencia temporal de solicitaciones. A continuación, se describe la construcción del pilote, su traslado y su hincapié en el emplazamiento seleccionado. Tras la hincapié del pilote, se montaron los sistemas de aplicación de las cargas mecánicas y térmicas y se terminó de instalar la instrumentación externa necesaria para medir y registrar los parámetros necesarios para la realización del estudio

En el **capítulo cinco** se estudia el comportamiento térmico del sistema compuesto por el pilote termoactivo y el terreno que lo rodea. Para ello ha sido necesario determinar, mediante ensayos de laboratorio, los parámetros térmicos fundamentales del terreno.

Los resultados obtenidos a través de la instrumentación durante los diferentes ensayos mecánicos y térmicos realizados se muestran en el **capítulo seis**, siguiendo el orden cronológico de los ensayos experimentales realizados.

A continuación, se estudian y valoran en detalle estos datos, en el **capítulo siete**. Este capítulo de análisis de resultados se ha organizado de la misma forma que el capítulo anterior, siguiendo el orden cronológico de los ensayos experimentales realizados.

Por último, se ofrecen en el **capítulo ocho** las principales conclusiones obtenidas del trabajo realizado y los trabajos futuros que de él pueden derivar

CAPITULO II
CONCEPTOS BÁSICOS

II.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE PILOTES

II.1.1 *Definición. Cargas de un pilote*

Según la norma UNE-EN 12794:2006+A1:2008, se denomina pilote a un elemento alargado destinado a ser introducido en el suelo para proporcionar apoyo a las cimentaciones. De geometría alargada, se considera un elemento de cimentación profunda según el Código Técnico de la Edificación (CTE), dado que su longitud suele ser > 8 veces su diámetro o ancho.

Un pilote es un elemento constructivo utilizado para cimentación de obras, que permite trasladar las cargas hasta un estrato resistente del suelo, cuando éste se encuentra a una profundidad tal que hace inviable, técnica o económicamente, una cimentación más convencional mediante zapatas o losas. Tiene forma de columna colocada en vertical en el interior del terreno sobre la que se apoya el elemento que le trasmite las cargas (pilar, encepado, losa...) y trasmite la carga al terreno por rozamiento del fuste con el terreno, apoyando la punta en capas más resistentes o por ambos métodos a la vez. La cimentación mediante pilotes está indicada cuando:

- No existe una capa resistente, a la profundidad alcanzable con zapatas o pozos. El terreno se encuentra a más de 5 m de profundidad.
- La presencia de agua y la permeabilidad del terreno impiden la ejecución de cimentaciones superficiales.
- Se quiere reducir o limitar los asentos del edificio.
- Las cargas son muy elevadas y están concentradas en pocos pilares
- Se quiere evitar la incidencia del nuevo edificio en las cimentaciones adyacentes.

En los pilotes se pueden diferenciar tres partes: la cabeza o parte superior, la punta o parte inferior y el fuste que forma el cuerpo del pilote.

A diferencia de una cimentación superficial, que transmite la carga al terreno por la superficie inferior de la misma, los pilotes transmiten la carga, en parte por el fuste y en parte por la punta de los mismos (Figura II-1).

- Cuando el pilote está instalado en un terreno más o menos homogéneo, la transferencia de cargas se hace a través del fuste y de la punta y se habla de un **pilote flotante**.

- Cuando la punta del pilote descansa en un substrato muy resistente y poco deformable sobre el que existe un suelo blando, prácticamente toda la carga llega a la base del pilote y entonces se habla de un **pilote columna**.

Naturalmente, existen toda clase de situaciones intermedias, con mayor o menor transferencia de carga por el fuste y por la punta, en función de las características del terreno.

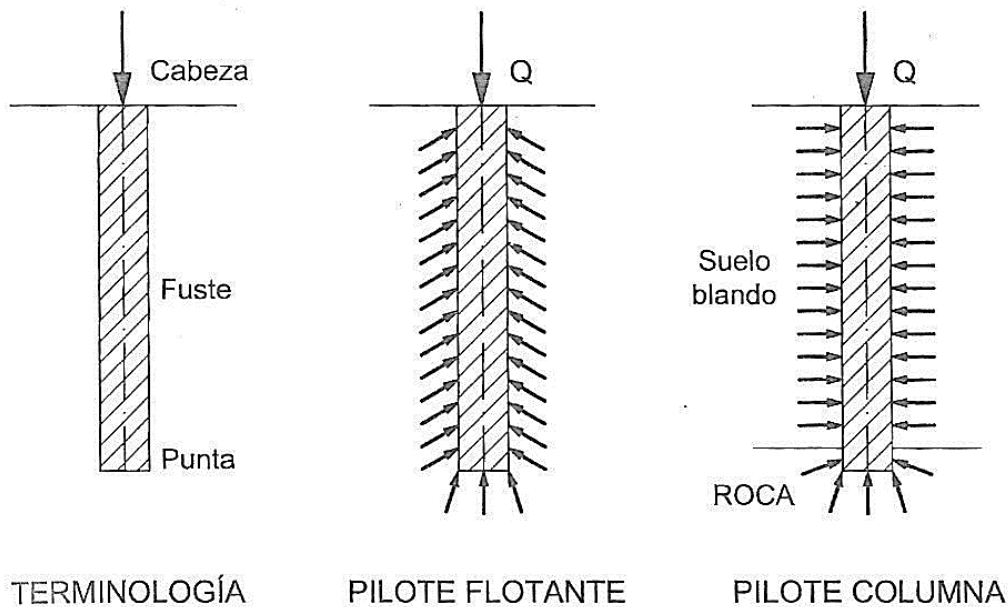


Figura II-1. Terminología y transferencia de cargas de un pilote (Muzás, 2007)

II.1.2 Tipos de pilotes

Para clasificar los pilotes, hay que considerar que en su fabricación se pueden diferenciar dos aspectos distintos: la fabricación del elemento estructural y su instalación dentro del terreno. Por ello, atendiendo a los dos aspectos anteriores, los pilotes se pueden clasificar según distintos criterios:

- Por la forma de instalación en el terreno
 - **Los pilotes de desplazamiento** son aquellos que se instalan en el terreno provocando el desplazamiento lateral del mismo, bien por la hinca de un pilote prefabricado, o bien mediante la hinca del útil con el que se lleva a cabo la perforación.

- **Los pilotes de extracción** son aquellos en los que se perfora un orificio, mediante excavación y extracción del terreno
- Por el método de fabricación del elemento estructural
 - Pilotes prefabricados
 - Pilotes hormigonados “in situ”
- Por el tipo de material
 - Pilotes de madera
 - Pilotes metálicos
 - Pilotes de hormigón armado
 - Pilotes de hormigón pretensado

Combinando estos tres criterios, el Documento Básico SE-C Seguridad estructural – Cimientos del Código Técnico de la Edificación enuncia los tipos de pilotes según el método constructivo (desplazamiento/extracción), la fabricación del pilote in situ o en fábrica (prefabricado), el tipo de material (madera, acero, fundición, hormigón), la instalación de entubación temporal, permanente o sin entubación, etc. En la Figura II-2 se propone un esquema que resume todos los criterios de clasificación de pilotes, siguiendo las indicaciones del Código Técnico de la Edificación y la norma UNE-EN 12699:2001).

En la selección del tipo de pilote, se tienen en cuenta los siguientes factores:

- La naturaleza de las distintas capas del terreno y su resistencia.
- El espesor del terreno a atravesar o longitud previsible de los pilotes.
- Las cargas que deben transmitir los pilotes.
- El número de pilares a cimentar, es decir, el volumen de la obra de pilotaje.
- Los condicionantes especiales, como el trabajo en zona urbana, agresividad del terreno, existencia de acciones horizontales o dinámicas, etc.

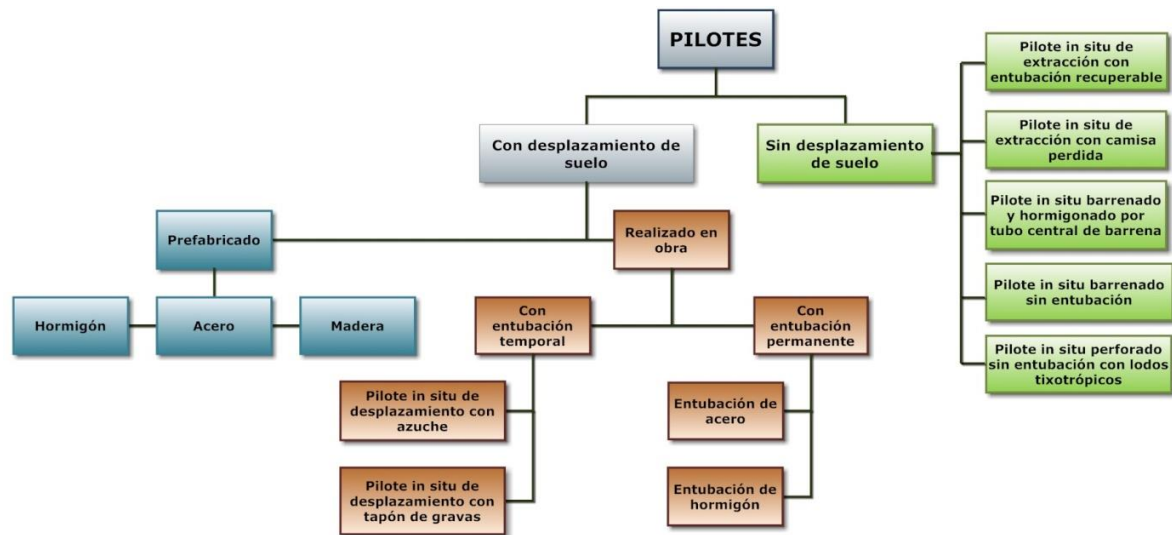


Figura II-2. Clasificación de pilotes (a partir de UNE-EN 12699:2001 y CTE)

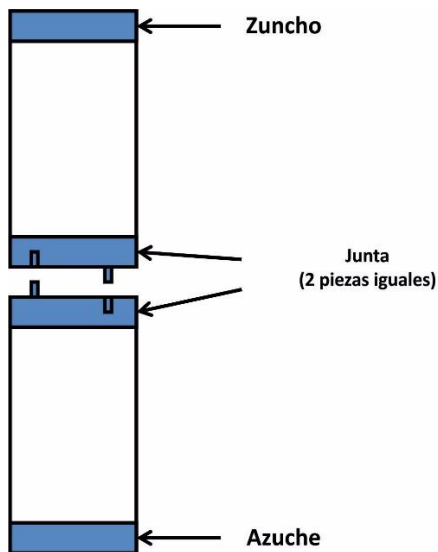
El pilote objeto de estudio en este trabajo es un pilote prefabricado de hormigón armado, instalado en el terreno mediante un proceso de hinca, por lo que se trata de un pilote de desplazamiento. Este tipo de pilotes presentan una serie de ventajas que los hacen interesantes:

- Requieren menor plazo de ejecución de obra.
- La hinca es una prueba para el terreno.
- La hinca mejora y densifica ciertos terrenos.
- No hay que llevar al vertedero los productos de excavación.
- Tienen posibilidad de ser colocados inclinados.
- Tienen más capacidad para absorber esfuerzos horizontales.
- Posibilidad de ejecución a flote en obras fluviales o marítimas.

Por otro lado, los pilotes prefabricados presentan también inconvenientes:

- Imposibilidad de atravesar terrenos con bolos o capas duras.
- Posibles daños al pilote durante la hinca.
- La hinca en arcilla puede empeorar la calidad de ésta, por remoldeo.
- La longitud prefijada puede resultar corta o en exceso.
- Necesita de maquinaria alta y pesada, que limita el tamaño del pilote.
- Necesita de un parque de prefabricación y del transporte a obra.
- Cuantía alta de armadura, necesaria para el manejo del pilote.
- Vibraciones y ruidos durante la hinca.

Los pilotes de hormigón armado son los pilotes prefabricados más habituales hoy en día. Suelen presentar secciones cuadradas, de 30 ó 50 cm de lado, hexagonales u octogonales.



Los pilotes terminan normalmente en punta, que puede ir equipada o no, con un **azuche** para facilitar la penetración y evitar la rotura. Además, durante la hinca, debe protegerse la cabeza con un elemento denominado sombrerete, casco o **zuncho de refuerzo**, para evitar su deterioro. Por último, los pilotes empalmables se fabrican en tramos cortos terminados en piezas especiales que permiten su empalme formando una junta (Figura II-3).

Figura II-3. Elementos de refuerzo en un pilote

II.1.3 Carga de hundimiento de un pilote aislado

La resistencia estructural de los pilotes aislados se define por su **carga admisible** o **tope estructural**, determinado a partir de la resistencia de los materiales que componen el pilote, a la que se le aplica un adecuado coeficiente de seguridad.

Por otro lado, cuando un pilote se somete a una carga vertical, se va introduciendo en el terreno conforme ésta aumenta, transfiriendo parte de la misma al terreno circundante del fuste y otra parte al terreno situado en la punta. Con el incremento de la carga, el asiento de la cabeza aumenta al principio de manera casi lineal, para ir creciendo cada vez más hasta llegar al límite en el que se agota la resistencia del terreno. Este límite corresponde a la carga de hundimiento del pilote (Figura II-4).

Por lo tanto, la **carga de hundimiento o Estado Límite Último de Hundimiento** se corresponde con la carga que produce la rotura, es decir, la plastificación del terreno y en última instancia, grandes deformaciones (Das, 1998).

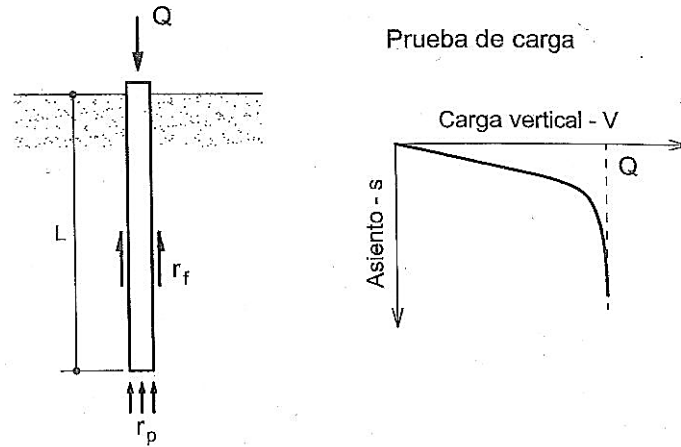


Figura II-4. Carga de hundimiento de un pilote aislado (Muzás, 2007)

Habitualmente, la expresión general de la carga de hundimiento se escribe de la forma:

Ecuación II-1

$$Q_h = A_p \cdot r_p + A_f \cdot r_f$$

Donde:

- A_p es el área de la punta
- r_p es la resistencia unitaria de la punta
- A_f es el área del fuste
- r_f es la resistencia unitaria medida por el fuste

La fórmula general se suele utilizar con un coeficiente de seguridad global $F=3$ en la resistencia de punta y $F=2,5 - 3,0$ en la resistencia de fuste.

Los métodos para determinar la carga de hundimiento, o lo que es lo mismo, la capacidad portante del terreno, son diversos, siendo de aplicación unos u otros en función del tipo de pilote:

- Las **pruebas de carga** se suelen utilizar en obras singulares, o con gran número de pilotes y sirven para corroborar “in situ” las hipótesis utilizadas en el proyecto de la cimentación. Es, no obstante, el método principal preconizado por el Eurocódigo 7.
- Las **fórmulas de hinca** tienen aplicación en los pilotes de desplazamiento, sean prefabricados o moldeados in situ.

- Las **fórmulas analíticas** son de aplicación a todo tipo de pilotes y su denominación obedece a que se utilizan expresiones de resistencia de tipo teórico, aunque algunas hayan tenidos posteriormente una comprobación experimental.
- Las **fórmulas empíricas** se basan en extrapolación al caso de los pilotes de los resultados de algunos ensayos que, de manera directa o indirecta, determinan la capacidad resistente del terreno.

Experiencias publicadas ya en los años 60 del siglo XX (Vesic, 1977; Kérisel et al., 1965) concluyen que en terrenos homogéneos, tanto la resistencia por punta como la resistencia por fuste no crecen indefinidamente, sino que alcanzan un límite con la profundidad.

II.1.3.1 Fórmulas analíticas

Resistencia por punta

Se recogen a continuación las fórmulas propuestas por Brinch Hansen (1970):

Ecuación II-2

$$Q_p = A_p \cdot (q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q + C \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c)$$

O bien:

Ecuación II-3

$$Q_p = A_p \cdot [(q + C \cdot \cot \phi) \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q - C \cdot \cot \phi]$$

Donde:

N_q es el coeficiente de capacidad portante:

Ecuación II-4

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \cdot \tan \phi}$$

q es la presión efectiva existente en el nivel de la punta del pilote

ϕ es el ángulo de rozamiento interno del terreno.

C es la cohesión del terreno

s_q es el coeficiente de forma, para $\phi \geq 25^\circ$: $s_q = 1,2 + \tan^6 \phi$

d_q es el coeficiente de profundidad: $d_q = 1 + \frac{0,35}{\frac{B}{D} + \frac{0,6}{1 + 7 \tan^4 \phi}}$

B es el diámetro del pilote

A_p es el área de la punta

D es la profundidad de la punta, medida dentro de la capa resistente y no desde la superficie del terreno.

Existe una profundidad crítica D_c , para la cual se alcanza un límite. Este valor, según Caquot y Kérisel (1948), vale:

Ecuación II-5

$$D_c = \frac{B}{4} \cdot 10^{1,8 \cdot \tan \phi}$$

Por otro lado, el producto ($N_q \cdot s_q \cdot d_q$) tiene un límite que según Caquot y Kérisel (1948), vale:

Ecuación II-6

$$N_q^* = N_q \cdot s_q \cdot d_q = 10^{2,7 \cdot \tan \phi} \text{ a } 10^{3,04 \cdot \tan \phi}$$

A este valor trató de acercarse Brinch-Hansen (1970) con su formulación.

En la Figura II-5 se recoge la representación de estos valores de N_q^* , apareciendo con línea continua los valores menores, más conservadores.

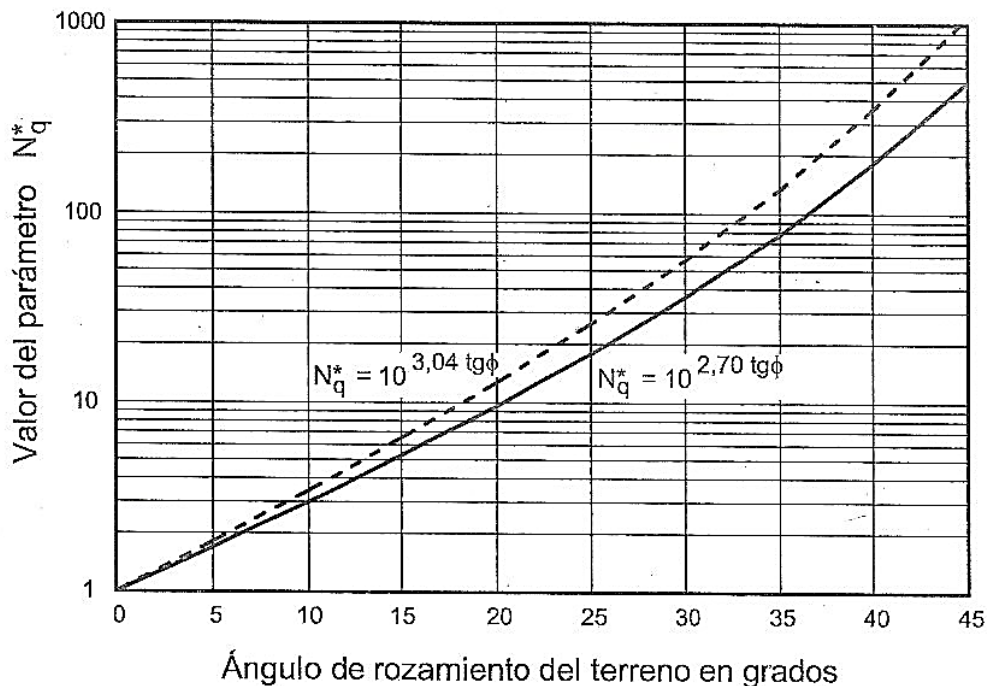


Figura II-5. Valores límite del coeficiente N^*_q (Caquot and Kérisel, 1948)

En arcillas saturadas a corto plazo, es decir con los parámetros:

- $\phi_u = 0$
- $c_u = \frac{1}{2} \cdot q_u$

La resistencia de punta tiene como límite el siguiente valor:

Ecuación II-7

$$Q_p = A_p \cdot 9,0 \cdot c_u$$

Para alcanzar este límite es preciso que la punta penetre lo suficiente (cuatro diámetros) dentro de la capa.

Resistencia por fuste

De manera general, la resistencia por fuste, cuando hay varios estratos de terreno, se formula de la siguiente manera:

Ecuación II-8

$$Q_F = \text{perímetro} \cdot \sum (r_f \cdot \Delta L)$$

Donde r_f es la resistencia unitaria por fuste en el tramo de espesor ΔL

Terreno granular

En este caso la resistencia unitaria por el fuste viene dada por la expresión:

Ecuación II-9

$$r_f = K_f \cdot \tan \phi \cdot \sigma'_z = \beta \cdot \sigma'_z$$

Donde:

σ'_z es la presión vertical efectiva, en un punto determinado

ϕ es el ángulo de rozamiento interno del suelo

K_f es un coeficiente de empuje horizontal, para el cual existen diversas recomendaciones, o bien para el valor de $(\beta = K \cdot \tan \phi)$. Entre estas fórmulas se pueden citar:

Ecuación II-10

$$\beta = (1 - \sin \phi) \tan \phi \quad (\text{Burland, 1973})$$

Ecuación II-11

$$\beta = \frac{\sin \phi \cdot \cos \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad (\text{Vesic, 1977})$$

De estas dos expresiones la primera es más conservadora, dando unos valores máximos del orden de ($\beta = 0,30$) en el primer caso, y de ($\beta = 0,35$) en el segundo, para un ángulo de rozamiento del orden de 35° .

En ningún caso, según se ha convenido por la comunidad científica internacional, se debe considerar una resistencia por fuste superior a $100,0 \text{ kN/m}^2$.

Terreno coherente

En arcillas saturadas a corto plazo, la resistencia por fuste es igual a la adherencia c_a , para cuya evaluación puede utilizarse la Figura II-6, en la que se da la relación entre la adherencia y la cohesión no drenada c_u . En la figura se diferencian los pilotes hincados, con mayor resistencia, de los pilotes perforados.

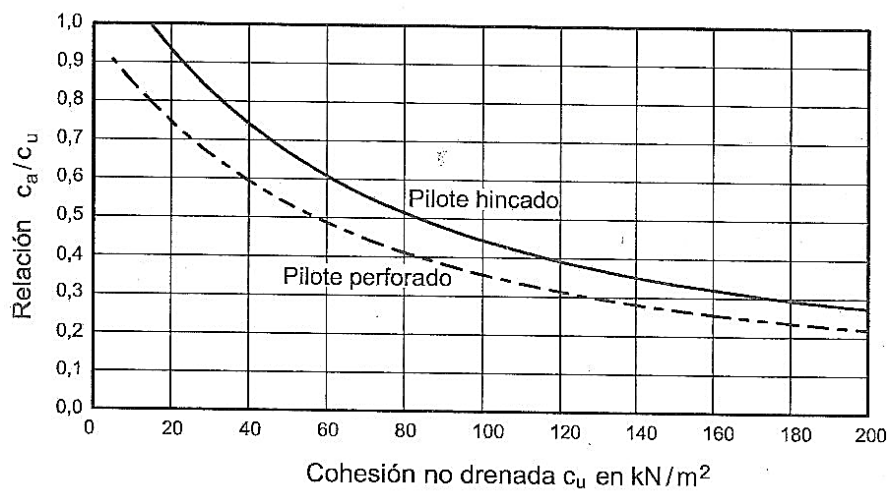


Figura II-6. Adherencia de pilotes en arcilla saturada (Muzás, 2007)

La Figura II-6 refleja la idea de que cuando la cohesión es baja, la adherencia es igual a la cohesión no drenada ($c_a = c_u$) mientras que cuando la cohesión aumenta, se adopta un coeficiente corrector cada vez más importante. En el límite, el coeficiente es igual al 25% para pilotes hincados, y al 20% para pilotes perforados. Al igual que en el

caso de los suelos arenosos, no debe considerarse una resistencia por fuste superior a 100,0 kN/m².

II.1.3.2 Fórmulas empíricas

Las fórmulas empíricas descritas a continuación, universalmente conocidas y admitidas, proceden de la teoría de la Universidad de Delft (Holanda), que relaciona resultados de diversos ensayos de penetración con valores de resistencia por punta y por fuste del pilote. Estas fórmulas se incorporaron en su momento a la norma holandesa NEN 6743 (1997) y al Eurocódigo 7 (2000). Estas fórmulas se basan en los siguientes parámetros:

- Resistencia a la penetración del penetrómetro estático (CPT): R_p .
- Resistencia a la penetración en el ensayo estándar (SPT): N_{30}
- Resistencia a la compresión simple de las arcillas saturadas (q_u)

Resistencia por punta

Habitualmente, los pilotes están sometidos a cargas verticales de compresión (que tienden a hundir el pilote en el terreno) que no deben superar la capacidad resistente del terreno. En este contexto, la carga de hundimiento de un pilote es la que produce la rotura por hundimiento del suelo, y se produce cuando la carga vertical actuante supera la resistencia del terreno, produciendo grandes deformaciones (asientos).

La carga de hundimiento de un pilote aislado se considera dividida en dos componentes: resistencia por punta y resistencia por fuste.

Q_p – resistencia soportada por punta

Q_f – resistencia soportada por adherencia con el terreno a lo largo del fuste

A su vez, la zona de influencia de punta contempla una zona activa y zona pasiva debajo y encima de punta respectivamente (Figura II-7).

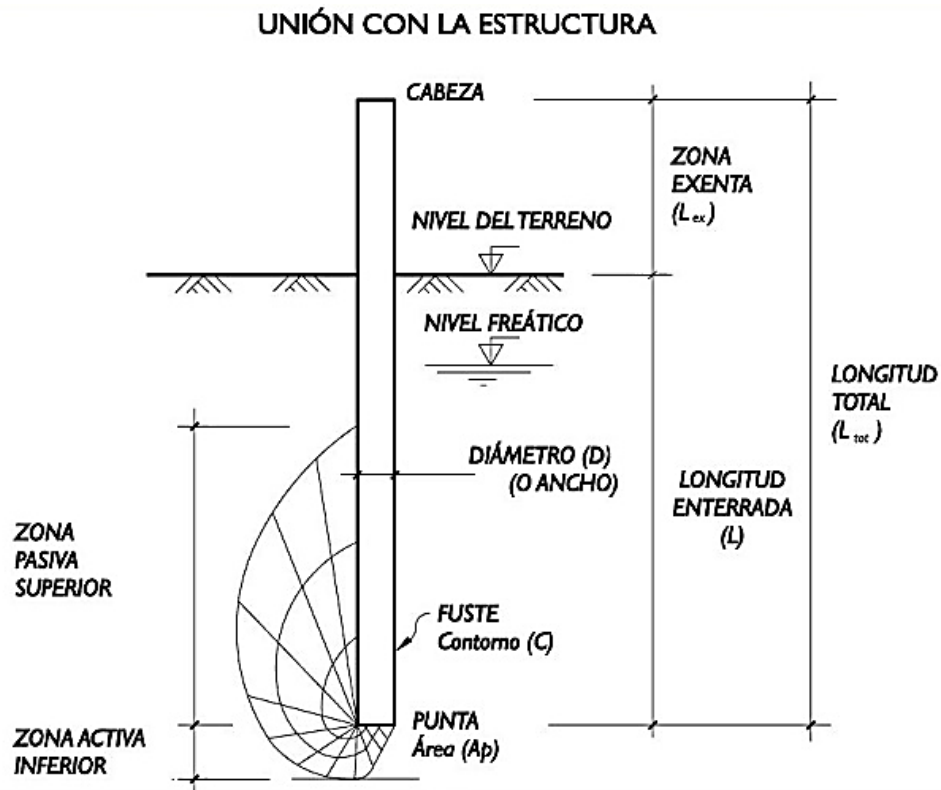


Figura II-7. Forma de rotura y zonas para la resistencia de punta (ROM-05, 2005)

En esta figura aparece la forma de rotura del terreno en la punta y las zonas que se deben considerar para determinar el valor medio de los parámetros que determinan la resistencia por punta *Zona Pasiva Superior* y *Zona Activa Inferior*. Los diferentes códigos y regulaciones proponen distintos espesores según se trate de arenas o arcillas saturadas, debido al diferente desarrollo de la forma de la rotura, la cual es función del ángulo de rozamiento interno del material. En ambos casos debe tenerse en cuenta la zona de seguridad si con ella se obtiene un valor promedio inferior de los parámetros considerados. Como ejemplo, la ROM-05 propone que:

- La zona activa inferior afecta hasta una profundidad bajo la punta del pilote igual a:
 - 2D – terrenos cohesivos.
 - 3D – terrenos granulares y rocas.
- La zona pasiva superior afecta hasta una altura sobre la punta del pilote igual a:
 - 4D – terrenos cohesivos.
 - 6D – terrenos granulares y rocas.

Terreno granular

La resistencia por punta se determina utilizando como datos los siguientes parámetros del terreno:

- Resistencia del cono estático: R_p (kN/m²)
- Resistencia a la penetración SPT: N_{30} (golpes/30 cm)

Entre estos dos parámetros se admite la siguiente relación:

Ecuación II-12

$$R_p(\text{kN/m}^2) = 400 \text{ a } 500 N_{30}(\text{golpes/30cm})$$

Para la resistencia por punta se utiliza la siguiente expresión:

Ecuación II-13

$$Q_p = A_p \cdot \alpha \cdot R_p$$

Donde:

A_p es el área de la punta

α es el coeficiente de minoración, función del diámetro D

Este coeficiente de minoración trata de tener en cuenta la diferencia que puede existir, respecto a la resistencia, entre el diámetro del penetrómetro y el diámetro del pilote. El coeficiente puede variar desde 1,0 (en diámetros normales) hasta 0,5 (en diámetros mayores de 1,0 m ($D \geq 1\text{m}$)). Aunque se justifica como un coeficiente corrector de escala, la razón de ser de este coeficiente es que la presión vertical del terreno, que interviene en la resistencia, no corresponde exactamente a la que existe al nivel de la punta, sino en la zona A de la forma de rotura.

Terreno coherente

En el caso de los terrenos coherentes, la resistencia por punta se determina utilizando como datos de partida, los siguientes parámetros del terreno:

- Resistencia a compresión simple: q_u (kN/m²)
- Resistencia del cono estático: R_p (kN/m²)

Entre estos dos parámetros se admite la relación:

$$R_p \cong 4,5q_u \text{ a } 7,5q_u$$

Habitualmente se utiliza el último valor cuando se parte de R_p , para estar del lado de la seguridad. En consecuencia, la resistencia de punta se determina mediante la siguiente expresión:

Ecuación II-14

$$Q_p = A_p \cdot 4,5 \cdot q_u \cong A_p \cdot 0,6 \cdot R_p$$

Resistencia por fuste

La resistencia por fuste del pilote es función de la resistencia unitaria por el fuste (r_f) de cada capa, y se calcula mediante la siguiente expresión:

Ecuación II-15

$$Q_F = \text{perímetro} \cdot \sum (r_f \cdot \Delta L)$$

Terreno granular

La resistencia por fuste se determina utilizando los siguientes parámetros del terreno:

- Resistencia del cono estático: R_p (kN/m^2)
- Resistencia a la penetración SPT: N_{30} (golpes/30 cm)

Como resistencia unitaria por fuste se considera:

Ecuación II-16

$$r_f = \left(\frac{1}{65} \text{ a } \frac{1}{200} \right) \cdot R_p (\leq 100,0 \text{ kN/m}^2)$$

En la Figura II-8 se recogen las curvas deducidas de los valores que relacionan N_{30} y r_f con los valores de la resistencia del cono estático R_p .

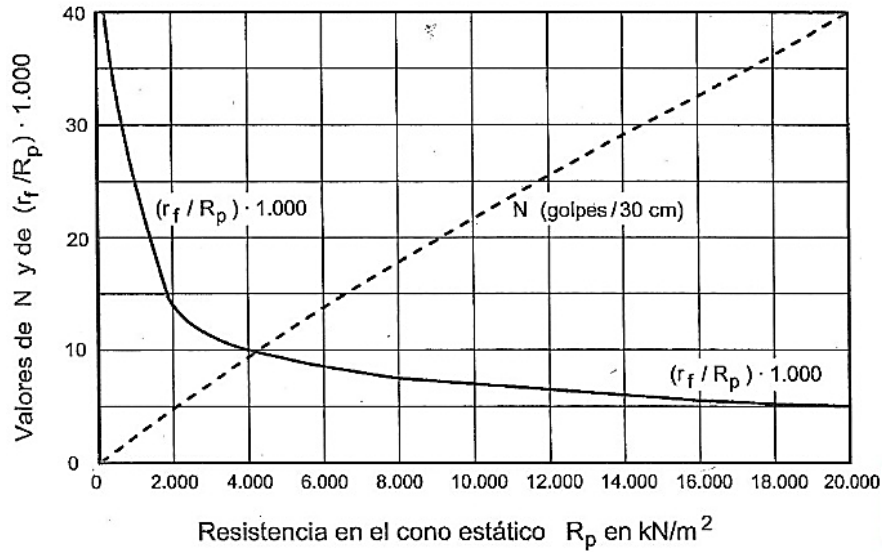


Figura II-8. Relación entre N_{30} y r_f con R_p (Muzás, 2007)

Terreno coherente

La resistencia de fuste se determina utilizando los siguientes parámetros del terreno:

- Resistencia del cono estático: R_p (kN/m^2)
- Resistencia a compresión simple: q_u (kN/m^2)

Como resistencia unitaria por fuste se considera:

Ecuación II-17

$$r_f = \left(\frac{1}{2} \text{ a } \frac{1}{10} \right) \cdot q_u (\leq 100,0 \text{ kN/m}^2)$$

Ecuación II-18

$$r_f = \left(\frac{1}{15} \text{ a } \frac{1}{75} \right) \cdot R_p (\leq 100,0 \text{ kN/m}^2)$$

En la Figura II-9 se recogen los valores de resistencia por fuste (r_f) en función de la resistencia a compresión simple (q_u) o de la resistencia del cono estático (R_p), en el supuesto de que entre ambos parámetros existe la relación $q_u = R_p/7,5$ como correlación más conservadora.

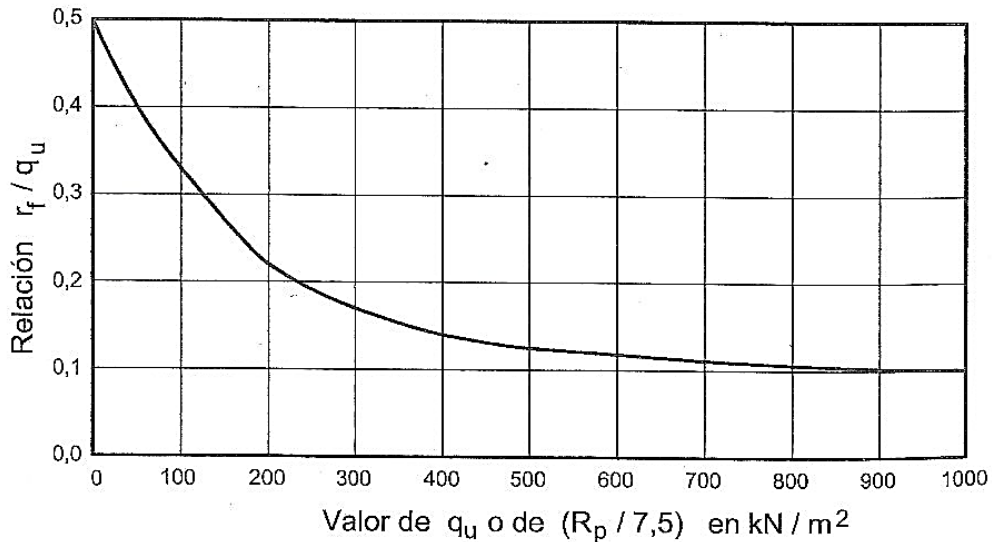


Figura II-9. Resistencia por fuste en terreno coherente (Muzás, 2007)

II.1.4 Cálculo de pilotes

Los requisitos básicos del diseño de pilotes son:

- Que exista un adecuado coeficiente de seguridad frente a la capacidad portante u otros modos de fallo
- Que los asentamientos debidos a las cargas de trabajo se encuentren dentro de unos límites aceptables

El planteamiento general del cálculo de pilotes consiste en determinar la carga que puede soportar un pilote aislado según la interacción suelo-estructura, considerando que los pilotes pueden resistir por punta, por fuste y por ambas. Para el dimensionado de la cimentación se distinguirá entre:

Estados límite último: asociados con el colapso total o parcial del terreno o con el fallo estructural de la cimentación. Se considera como estados límite últimos los debidos a:

- pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo a la cimentación por hundimiento, deslizamiento o vuelco.
- pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación.
- pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural.

- fallos originados por defectos que dependen del tiempo (durabilidad del material de la cimentación, fatiga del terreno sometido a cargas variables repetidas).

Estados límite de servicio: asociados con determinados requisitos impuestos a las deformaciones del terreno por razones estéticas y de servicio. Se consideran como estados límite de servicio los relativos a:

- los movimientos excesivos de la cimentación que puedan inducir esfuerzos y deformaciones anormales en el resto de la estructura que se apoya en ellos, y que, aunque no lleguen a romperla afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios o al funcionamiento de equipos e instalaciones.
- las vibraciones que al transmitirse a la estructura pueden producir falta de confort en las personas o reducir su eficacia funcional
- los daños o el deterioro que puede afectar negativamente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de la obra.

II.1.4.1 Regulación nacional e internacional

En España existen cuatro documentos que describen y regulan el diseño de pilotes. Por orden cronológico: el Código Técnico de la Edificación (CTE, 1999 - 2008), las Recomendaciones para obras marítimas (ROM, 2005), el Eurocódigo 7 (Proyecto geotécnico), de ámbito europeo (2007), y la Guía de cimentaciones en obras de carretera (GCOC, 2009). Se presenta a continuación cada una de ellas:

- **El Código Técnico de la Edificación (CTE, 2008)** es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de Ordenación de la Edificación (LOE). Las Exigencias Básicas de calidad que deben cumplir los edificios se refieren a materias de seguridad: seguridad estructural, seguridad contra incendios, seguridad de utilización; y habitabilidad: salubridad, protección frente al ruido y ahorro de energía. El Código Técnico de la Edificación (CTE) cuenta con un documento específicamente redactado para abordar las cimentaciones: Documento Básico SE-C: seguridad estructural. Cimientos. Texto modificado por R.D. 137/2007 de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores (BOE 25/01/2008).

- **Las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM-05, 2005)**, reúnen los criterios necesarios para la definición y realización de los trabajos de investigación geotécnica, la elaboración de la información obtenida con dicha investigación, los métodos de análisis de los diversos aspectos de tipo geotécnico y modo de evaluar los parámetros en cada caso y, finalmente, el estudio de los problemas geotécnicos que presentan cada una de las tipologías estructurales más habituales en las obras marítimas y portuarias. El ámbito de aplicación de las Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias se extiende a todas las obras marítimas y portuarias cualquiera que sea su clase o destino, así como los materiales y elementos empleados en su construcción. Ésta, al igual que la GCOC no es una normativa, por lo que no es, en principio, de obligado cumplimiento en la ejecución de las obras españolas.
- Los Eurocódigos estructurales son un conjunto de normas europeas de carácter voluntario, encargadas por la Comisión Europea al Comité Europeo de Normalización (CEN), que recogen métodos comunes en todos los Estados Miembro de la Unión Europea para el cálculo y dimensionado de estructuras y de productos prefabricados estructurales. Entre todos los eurocódigos, el **Eurocódigo 7 “Proyecto geotécnico” (EC7, 2007)** es el que afecta de forma directa los métodos de cálculo en el área de la geotecnia. Este documento aborda con nitidez conceptos como los estados límites, los coeficientes de seguridad parciales, tanto en acciones como en propiedades del terreno; y las frecuencias de ensayos y reconocimientos precisos. EL EC7 no establece unos valores de coeficientes parciales únicos, sino que cada país los establece en un anexo nacional. En España, se publicó en octubre de 2014 el borrador del Anejo Nacional AN/UNE-EN 1997-1 para definir las condiciones de aplicación en el territorio español. En este documento se fijan los valores de los parámetros de determinación nacional (NDP) que el EC7 deja abiertos para ser establecidos a nivel nacional.
- **La Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (GCOC, 2009)** es una publicación monográfica elaborada por la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras con la colaboración del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX y de un grupo numeroso de expertos nacionales de geotecnia y estructuras. Pretende describir las reglas de buena práctica que han de

aplicarse en los proyectos, en la construcción y en la conservación de las obras de cimentaciones en carreteras, así como ayudar al proyectista en las fases de investigación del terreno, estudio de alternativas y proyecto; recoge la práctica habitual en geotecnia, de adoptar coeficientes de seguridad globales. Es una guía para el empleo en obras de carretera, al contrario que el CTE no es una normativa, por lo que no es, en principio, de obligado cumplimiento, salvo donde determine la Dirección General de Carreteras en el ámbito de sus competencias.

II.1.4.2 Coeficientes parciales y globales

De los cuatro documentos regulatorios de cálculo de pilotes vigentes en España, el CTE (1999-2008) y el EC7 (2007) proponen un procedimiento consistente en aplicar coeficientes de aminoramiento parciales, tanto en la comprobación del estado límite último como el estado límite de servicio.

Así, en el CTE (2008), la comprobación del estado límite último mediante el método de los coeficientes parciales, exige que se verifique **la resistencia local o global del terreno**, para las situaciones de dimensionado pertinentes, mediante la condición:

Ecuación II-19

$$E_d \leq R_d$$

Siendo

E_d el valor de cálculo del efecto de las acciones;

R_d el valor de cálculo de la resistencia del terreno.

El valor de cálculo del efecto de las acciones (E_d) sobre la cimentación se determinará, para cada situación de dimensionado, según la siguiente ecuación:

Ecuación II-20

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left(\gamma_F \cdot F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right)$$

El valor de cálculo de la resistencia del terreno (R_d) se determinará según la siguiente ecuación:

Ecuación II-21

$$R_d = \frac{R}{\gamma_R} \left(\gamma_F \cdot F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right)$$

Siendo

F_{rep} el valor representativo de las acciones que intervienen en la situación de dimensionado considerada;

X_k el valor característico de los materiales;

a_d el valor de cálculo de los datos geométricos;

γ_R el coeficiente parcial para la resistencia

γ_E el coeficiente parcial para el efecto de las acciones;

γ_F el coeficiente parcial para las acciones;

γ_M el coeficiente parcial para las propiedades de los materiales.

Los posibles valores de resistencia frente al hundimiento (γ_R) propuestos por el CTE se muestran en la siguiente tabla.

Tabla II-1: Valores de γ_R propuestos en el CTE (2008)

Situación de dimensionado	Coeficiente de seguridad a hundimiento (γ_R)	
	Para cálculos basados en:	Para cálculo basado en:
	Formulas analíticas Ensayos de campo	Pruebas de carga Pruebas de hinca con control electrónico, contrastadas con pruebas de carga
Persistente (condiciones normales de uso)	3,00	2,00
Transitoria (duración limitada)		
Extraordinaria (situaciones excepcionales, incluyendo sismo)	2,00	1,50

Los coeficientes γ_E , γ_F y γ_M se definen para cada tipo de cimentación en la Tabla II-2

Tabla II-2: Coeficientes parciales propuestos en el CTE (2008)

Situación de dimensionamiento	Estado límite último	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
Persistente o transitoria	Hundimiento				
	Métodos basados en ensayos de campo o fórmulas analíticas	3,0	1,0	1,0	1,0
	Métodos basados en pruebas de carga hasta rotura	2,0	1,0	1,0	1,0
	Métodos basados en pruebas dinámicas de hinca con control electrónico de la hinca y contraste con pruebas de carga hasta rotura	2,0	1,0	1,0	1,0
	Estabilidad global	1,0	1,8	1,0	1,0
	Capacidad estructural	-	-	1,6	1,0
	Arrancamiento	3,5	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	3,5	1,0	1,0	1,0
Extraordinaria	Hundimiento				
	Métodos basados en ensayos de campo o fórmulas analíticas	2,0	1,0	1,0	1,0
	Métodos basados en pruebas de carga hasta rotura	1,5	1,0	1,0	1,0
	Métodos basados en pruebas dinámicas de hinca con control electrónico de la hinca y contraste con pruebas de carga hasta rotura	1,5	1,0	1,0	1,0
	Estabilidad global	1,0	1,2	1,0	1,0
	Capacidad estructural	-	-	1,0	1,0
	Arrancamiento	2,3	1,0	1,0	1,0
	Rotura horizontal	2,3	1,0	1,0	1,0

Por otro lado, la comprobación del **estado límite de servicio** exige que se cumpla:

$$E_{ser} \leq C_{lim}$$

Donde:

E_{ser} es el efecto de las acciones para cada situación de dimensionado, que se obtienen con las mismas combinaciones que en estados últimos y considerando además otras que tienen en cuenta la duración de las acciones

C_{lim} es el valor límite para la misma situación de dimensionado.

En el estado límite último el EC7 establece el uso de coeficientes de seguridad parciales aplicados a acciones, parámetros materiales y resistencia de pilotes. Para

los estados límites de servicio, el coeficiente de seguridad parcial debe ser 1, es decir, tanto las acciones como las propiedades del suelo no están minoradas. Para cumplir el estado límite de servicio debe garantizarse que $E_d \leq C_d$, siendo:

E_d el asentamiento de diseño del pilote

C_d el asentamiento límite aceptado

La resistencia de cálculo para el estado límite último $R_{c;d}$ utilizando métodos analíticos, se obtiene según la relación siguiente:

Ecuación II-22

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s}$$

Donde:

$R_{c;d}$: Es la Resistencia de diseño a compresión del pilote

$R_{s;k}$: Es el valor característico de resistencia por fuste

$R_{b;k}$: Es el valor característico de resistencia por punta

γ_b y γ_s son los coeficientes de seguridad parciales de la punta y fuste respectivamente.

Por otro lado, el EC7 (2007) no establece unos valores de coeficientes parciales únicos, sino que cada país los establece en un anexo nacional. En España, se publicó en octubre de 2014 el borrador del Anejo Nacional AN/UNE-EN 1997-1 para definir las condiciones de aplicación en el territorio español. En este documento se fijan los valores de los parámetros de determinación nacional (NDP) que el EC7 deja abiertos para ser establecidos a nivel nacional.

La Tabla II-3 lista los coeficientes parciales γ_R aplicables a las resistencias de cálculo de pilotes hincados, tanto en estructuras para las que se aplica el Código Técnico de la Edificación (CTE) como para las que no se aplica.

Tabla II-3: Coeficientes parciales γ_R aplicables a las resistencias de cálculo de pilotes hincados

Resistencia	Símbolo	Valor	
		Estructuras para las que se aplica el CTE	Estructuras para las que no se aplica el CTE
Punta	γ_b	1,55	1,25
Fuste (pilotes a compresión)	γ_s	1,55	1,05
Total combinada (pilotes a compresión)	γ_t	1,40	1,15
Fuste (pilotes a tracción)	$\gamma_{s,t}$	1,80	1,05

A diferencia del CTE (2008) y el EC7 (2007), la ROM-05 (2005) y la Guía de cimentaciones en obras de Carreteras (GCOC, 2009) hacen uso de un coeficiente de seguridad global frente al hundimiento de una cimentación profunda constituida por un grupo de pilotes, como el cociente entre la carga de hundimiento del grupo y la carga vertical que actúa sobre el grupo en cada situación.

La ROM-05 propone una tabla de valores de Coeficiente de seguridad global F_x para la situación de proyecto, combinación de acciones y tipo de pilote en estudio para la verificación de modos de fallo geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos (Tabla II-4).

Tabla II-4: Coeficientes de seguridad frente al hundimiento de pilotes (ROM-05)

Tipo de pilote	Procedimiento de cálculo de la carga de hundimiento	Valores de los coeficientes de seguridad para las combinaciones de acciones		
		Cuasi-permanente (F_1)	Fundamental (F_2)	Accidental (F_3)
Cualquiera	Métodos analíticos	2,50	2,20	2,20
	Ensayo SPT	2,50	2,20	2,00
	Penetrómetro dinámico continuo y presiómetro	2,60	2,30	2,10
	CPT	2,00	1,80	1,70
Hincados	Con control de avance y fórmula de Hiley	2,50	2,20	2,00
	Con control de avance y ecuación de onda	2,00	1,80	1,70
	Con control electrónico	1,60	1,50	1,40
	Con control electrónico y prueba de carga	1,40	1,30	1,30

Paralelamente, según la GCOC el **coeficiente de seguridad global F_x** será el mayor de los siguientes tres valores:

- La carga vertical sobre el pilote más solicitado del grupo, en situación persistente con la combinación de cargas cuasi-permanentes.
- La carga vertical sobre el pilote más solicitado del grupo, en cualquiera de las situaciones y combinaciones de acciones que se indican a continuación dividida por 1,10

- El mayor valor de entre los correspondientes a las combinaciones de acciones características (en situaciones persistentes o transitorias y de corto plazo).
- El mayor valor de entre las situaciones transitorias y de corto plazo, con la combinación de acciones cuasi-permanentes.
- La carga vertical sobre el pilote más cargado del grupo, en cualquier situación accidental, dividida por 1,25.

La Tabla II-5 muestra los valores propuestos de coeficiente de seguridad para las combinaciones de acciones según GCOC.

Tabla II-5: Valores de coeficientes de seguridad para las combinaciones de acciones (GCOC)

Tipo de pilote	Procedimiento de cálculo de la carga de hundimiento	Valores de los coeficientes de seguridad para las combinaciones de acciones		
		Cuasi-permanente (F ₁)	Fundamental (F ₂)	Accidental (F ₃)
Cualquiera	Métodos analíticos	3,00	2,60	2,20
	Ensayo SPT	3,00	2,60	2,20
	Penetrómetro dinámico continuo y presiómetro	3,50	3,00	2,60
	CPT	2,50	2,20	1,80
Hincados	Con control de avance y fórmula de Hiley	$(6-s) \geq 3,00$	$(5-s) \geq 2,60$	$(4-s) \geq 2,20$
	Con control de avance y ecuación de onda	$(5-s) \geq 2,50$	$(4-s) \geq 2,20$	$(3-s) \geq 1,80$
	Con control electrónico	2,00	1,70	1,50
	Con control electrónico y prueba de carga	1,70	1,50	1,20

II.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE GEOTERMIA

II.2.1 *Origen del calor en el terreno*

La Energía Geotérmica es la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie del terreno (Directiva Europea para la promoción de Energías Renovables 2009/28/CE). Esta misma Directiva Europea nombra en su artículo 2 la energía geotérmica como una energía renovable, junto con la eólica, la solar, la aerotérmica, hidrotérmica, oceánica, hidroeléctrica, biomasa, nieve, gases de vertedero, gases de planta de tratamiento de aguas residuales y biogases.

La corteza terrestre recibe energía en forma de calor proveniente de dos fuentes: el sol y el centro de la Tierra. Ello facilita la clasificación de la energía, los recursos, los yacimientos y la ciencia que los estudia en dos grandes campos denominados respectivamente geotermia profunda y somera o superficial. El límite entre ambos tipos es variable, aunque se suele establecer arbitrariamente a una profundidad de 400 m (Eugster & Sanner, 2007).

II.2.1.1 *Origen interno del calor: Geotermia profunda*

El 99% de la masa de la Tierra está sometida a una temperatura superior a los 1.000°C, y únicamente un 0,1% de la misma soporta temperaturas inferiores a los 100°C. Los orígenes del calor interno de la Tierra son (Llopis y Rodrigo, 2008):

- Desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza del manto, principalmente U^{235} , U^{238} , Th^{232} y K^{40} .
- Calor inicial que se liberó durante la formación del planeta hace 4.500 millones de años, y que todavía está llegando a la superficie
- Movimientos diferenciales entre las diferentes capas de la Tierra, principalmente manto y núcleo
- Cristalización del núcleo: El núcleo externo (líquido) está cristalizando continuamente en la zona de transición con el núcleo interno (sólido), liberando calor.

Las grandes diferencias de temperatura entre la superficie de la Tierra y las existentes en su interior originan un flujo continuo de calor hacia la superficie, estimándose que la energía que llega a la superficie terrestre en forma de calor por conducción, convección y radiación es de $42 \cdot 10^{12}$ Julios/segundo.

II.2.1.2 Origen solar del calor, Geotermia superficial

Además del calor interno, la superficie de la Tierra recibe del Sol en forma de calor $2 \cdot 10^{17}$ Julio/segundo, que es del orden de cuatro órdenes de magnitud superior al calor geotérmico. Esa energía penetra a escasa profundidad en el subsuelo, contribuyendo a mantener la superficie del planeta a una temperatura promedio de 15°C, y es irradiada de nuevo al espacio, no interviniendo en los procesos energéticos que afectan al interior de la Tierra. El calor a baja temperatura almacenado a poca profundidad en suelos, rocas y aguas subterráneas, recibe diferentes nombres: energía geotérmica somera o de baja entalpía o geotermia solar.

II.2.2 Clasificación: Tipos de geotermia y tipos de yacimientos

Las aplicaciones que se pueden dar al calor geotérmico, tanto de origen interno como superficial, dependen de su entalpía. (Entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido o un objeto puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/Kg o en Kcal/Kg.) La entalpía es el factor determinante en la generación de energía eléctrica directamente a partir del vapor de agua o de agua caliente del acuífero de alta temperatura, o de la posibilidad de usar el calor del agua directamente o mediante una bomba de calor geotérmica. Así pues, se establecen las cuatro categorías siguientes (Llopis y Rodrigo, 2008), descritas en la **Error! Reference source not found.:**

Tabla II-6: Tipos de yacimientos geotérmicos convencionales

Origen	T°C	Tipo de yacimiento	Usos
Profundo	> 150°C	De alta T°C	Permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica
	90-150°C	De media T°C	Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio que es el que alimenta las centrales
Superficial	30-90°C	De baja T°C	Su calor es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para la calefacción de edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas (Usos directos).
	< 30°C	De muy baja T°C	Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor (Usos directos y climatización)

II.2.2.1 Yacimientos de muy baja temperatura

Prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja temperatura (< 30°C). En cualquier punto de la superficie del planeta se puede captar y aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo, a pocos metros de profundidad, o en acuíferos poco profundos, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas.

La superficie del suelo intercambia calor con la atmósfera y sufre las variaciones diarias de temperatura hasta una profundidad de 0,5 m (Llopis y Rodrigo, 2008). Las variaciones de temperatura estacionales son perceptibles en el terreno hasta una profundidad de alrededor de 10-15 m. A partir de estos 10-15 m de profundidad y con poca circulación de agua subterránea, el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe y mantenerlo estable incluso a escala estacional, permaneciendo la temperatura constante durante todo el año. En resumen, debido en gran medida a la enorme inercia térmica de los materiales geológicos que componen la corteza terrestre, a pocos metros de profundidad la temperatura permanece estable, entre 7 y 15°C. El valor depende de la latitud y altitud del terreno, el clima, la vegetación, la cobertura del suelo, la pendiente, la presencia o no de nieve en superficie y de las propiedades intrínsecas del suelo. A partir de esta profundidad, la temperatura no depende de las variaciones estacionales, sino de las condiciones geológicas y geotérmicas (Figura II-10).

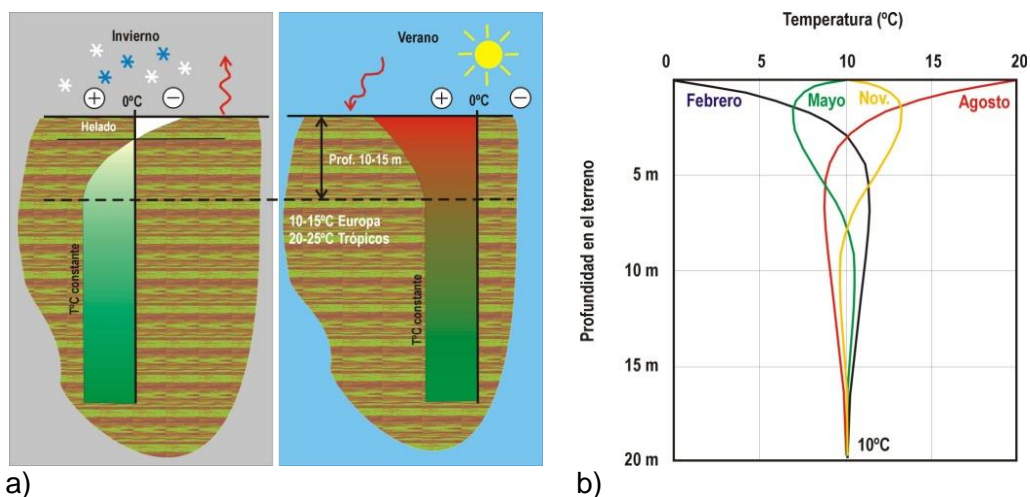


Figura II-10. a) Tendencia de la temperatura del terreno a permanecer constante durante todo el año a partir de una profundidad de 10-15 m. (Brandl, 2006), b) Perfil térmico del terreno en diferentes meses del año.

Paralelamente, por debajo de 20 m de profundidad la temperatura aumenta a razón de $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ como consecuencia del gradiente geotérmico (Figura II-11). En la mayor parte de las regiones del planeta las rocas se encuentran a una temperatura de $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$ a 500 m de profundidad.

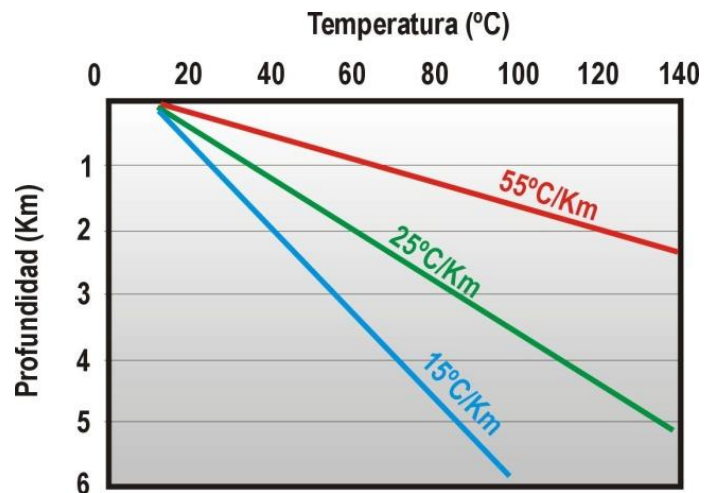


Figura II-11. Rangos de posibles gradientes geotérmicos en la Tierra.

II.2.2.2 Yacimientos de baja temperatura

Yacimientos geotérmicos de baja temperatura, entre 30°C y 90°C , pueden encontrarse en cuencas sedimentarias en las que el gradiente geotérmico sea normal o ligeramente superior. La única condición geológica requerida es la existencia a profundidad adecuada, entre 1.500 y 2.500 m, de formaciones geológicas permeables, capaces de contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor de las rocas. Con un gradiente geológico normal (alrededor de $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), a una profundidad de 2.000 m, la temperatura puede alcanzar 70°C o más (Llopis y Rodrigo, 2008).

II.2.2.3 Yacimientos de media temperatura

Yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas comprendidas entre 90°C y 150°C se encuentran en numerosos lugares del planeta (Llopis y Rodrigo, 2008):

- En cuencas sedimentarias a profundidades comprendidas entre 2.000 y 4.000 m
- En zonas de adelgazamiento litosférico
- En zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos
- En los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta temperatura, pero a menos profundidad ($< 1.000\text{ m}$)

Yacimientos de este tipo se encuentran en un gran número de zonas muy localizadas donde, debido a discontinuidades y fallas, el agua puede remontar fácilmente hasta la superficie, señalando su presencia en aguas termales.

Al igual que los yacimientos de alta temperatura, precisan de una intrusión magmática como fuente de calor, y de un acuífero con buena recarga. Se diferencian de ellos en que no existe una capa impermeable sobre el acuífero que mantenga el calor y la presión en el yacimiento.

II.2.2.4 Yacimientos de alta temperatura

Los yacimientos con fluidos geotermales, o con rocas calientes, a más de 150°C de temperatura, se encuentran en zonas geográficas con gradiente geotérmico elevado, hasta 30°C/100m.

Estas zonas suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica muy reciente y principalmente, regiones volcánicas situadas en bordes de plataformas litosféricas (Llopis y Rodrigo, 2008). Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1.500 y 3.000 m.

II.2.3 Tipos de aplicaciones

En el estado actual de la tecnología, se puede decir que la geotermia ofrece dos grandes grupos de fines o aprovechamientos: eléctricos y térmicos. Por un lado, es posible generar electricidad directamente a partir del vapor de agua que asciende mediante sondeos en yacimientos de alta temperatura (superiores a 100-150°C). Por otro lado, cuando el yacimiento presenta temperaturas por debajo de los 100°C, es posible darle un uso térmico en los sectores industrial, servicios y residencial, ya sea de forma directa o a través de bomba geotérmica en el caso de temperaturas muy bajas (por debajo de los 25°C).

Entre los usos térmicos cabe destacar que, aunque históricamente los balnearios y piscinas climatizadas constituyen la forma más antigua de aprovechamiento, en la actualidad es la calefacción el uso más frecuente de esta fuente limpia de energía, alcanzando una cuota de un 33%, seguido de baños, saunas (19%). Otros usos

habituales son los invernaderos (14%), la producción de agua caliente sanitaria y calefacción mediante bomba de calor (12%), el calentamiento de agua de piscifactoría (11%) y la industria (10%) (Barrero, 2008).

Finalmente, los recursos de muy baja temperatura reúnen dos características que las diferencian del resto:

- Se trata de un recurso energético que está debajo de cualquier terreno de cualquier lugar habitado del planeta, próximo a la superficie.
- Su posibilidad de aprovechamiento está supeditada al uso forzoso de bombas de calor geotérmico.

II.2.4 *Sistemas de intercambiadores de calor*

Los sistemas de intercambiadores de calor consisten en redes de tubos por los que circula el fluido portador de calor o caloportador, generalmente agua con anticongelante, que conectados a una o varias bombas de calor geotérmicas permiten el intercambio de calor con el terreno. Las tuberías, de 25 a 40 mm de diámetro, suelen ser de polietileno, polibutileno o polietileno reticulado PE-X, estos dos últimos utilizados en yacimientos de alta temperatura. La red de tuberías se construye por completo en fábrica, donde es probada antes de instalarse en la obra.

Los sistemas de intercambiadores de calor se pueden clasificar generalmente como sistemas abiertos y cerrados.

- **Sistemas abiertos:** Se extrae el agua subterránea mediante un sondeo “*de producción*” y se utiliza directamente como fluido portador de calor. Tras el proceso de intercambio de calor realizado en la bomba geotérmica, el agua es devuelta al terreno mediante otro sondeo “*de inyección*”, instalado a una apropiada distancia del sondeo de extracción con el fin de garantizar la correcta disipación térmica.
- **Sistemas cerrados:** los intercambiadores de calor son instalados en el subsuelo (ya sea en forma horizontal, vertical u oblicua), y un fluido caloportador circula dentro de los intercambiadores de calor, transportando el calor del terreno a la bomba y viceversa, configurando un circuito cerrado que en ningún momento entra en contacto con el agua subterránea.

El sistema no siempre se puede atribuir a una de estas dos categorías, como es el caso del aprovechamiento de agua de minas o de túneles. Para elegir el sistema más apropiado para una instalación específica, es necesario considerar varios factores como las características geológicas e hidrogeológicas del terreno (las instalaciones en sistema abierto requieren que el material presente una cierta permeabilidad), área y utilización de la superficie, existencia de fuentes potenciales de calor así como las características de calefacción y refrigeración de los edificios.

II.2.4.1 Sistemas abiertos

Si la permeabilidad del terreno es suficientemente elevada puede recurrirse a explotar la capa freática mediante dos sondeos, uno de producción, con una bomba sumergida que conduce el agua a la bomba de calor para, una vez extraída su energía y enfriada, ser vuelta a la capa freática por un pozo de reinyección o ser vertida al cauce fluvial (Figura II-12). Para ello, es necesario que el agua explotada presente una mínima calidad, es decir, poco contenido de hierro y sales solubles, para evitar problemas de obstrucción y corrosión.

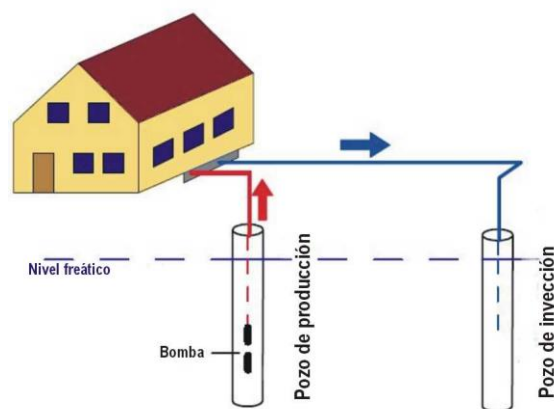


Figura II-12. Sistema abierto (Mands & Sanner, www.UBeG.de)

En sistemas abiertos que explotan acuíferos poco profundos, se requiere un estudio hidrogeológico local, con ensayos de conductividad hidráulica y térmica, así como ensayos de calidad del agua. Con los datos recopilados y los requisitos de diseño, se realizará una modelización numérica para la evaluación de impacto térmico asociado a su funcionamiento. En estos casos es necesaria una autorización para captación de agua. Sus principales ventajas e inconvenientes son:

Ventajas:

- El agua a 12°C es apropiada para su uso directo como medio refrigerante sin necesidad de refrigeración adicional.
- En presencia de abundante agua subterránea, el sistema de refrigeración es muy efectivo.

Desventajas:

- El bombeo de agua subterránea supone un gasto energético.
- Es necesario obtener licencia de explotación de aguas subterráneas.
- Rendimiento y fiabilidad de los sondeos es impredecible.
- Posibilidad de contaminación biológica.
- Es necesario diseñar con mucho detalle y cuidado los flujos anuales y estacionales de calor y frío.

II.2.4.2 Sistemas cerrados

Son sistemas en los que no se explota directamente el agua del acuífero, sino que se realiza una transferencia de calor al terreno mediante un fluido intermedio que puede ser agua con sal, agua con anticongelante o simplemente agua, que circula en el interior de una red de tubos o sondas “geotérmicas”. Estas sondas, a su vez, pueden disponerse formando un entramado horizontal enterrado a poca profundidad o pueden introducirse en el interior de un sondeo. A estas dos modalidades se les denomina horizontal y vertical respectivamente.

Intercambiadores de calor horizontales

Es el sistema cerrado más fácil de instalar. Consiste en bucles o redes de tubos de polietileno enterrados horizontalmente a una profundidad entre 1 y 1,5 m (Figura II-13). Dado que la recarga térmica principal de todos los sistemas horizontales la provee principalmente la radiación solar sobre la superficie de la Tierra, es importante no cubrir esta superficie con ningún tipo de construcción.

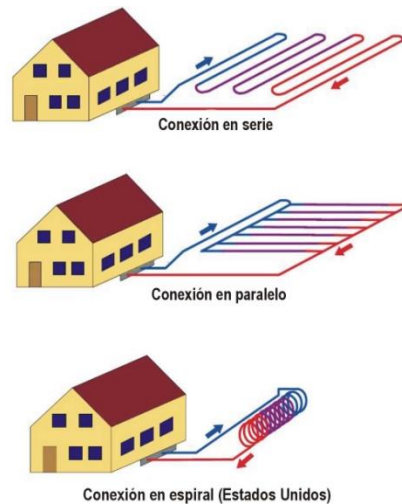


Figura II-13. Sistema cerrado de colectores de calor horizontales conectados en serie o en paralelo (Mands & Sanner, www.UBeG.de)

Este sistema es muy popular en Europa para acondicionar viviendas. Debido a restricciones de área disponible, se instala una red de tuberías formando un entramado denso, ya sea conectadas en serie o en paralelo. Con el tiempo, se han ido desarrollando en Estados Unidos nuevas redes de intercambiadores de calor geotérmico en forma de espiral (slinky) que permiten ahorrar espacio y hacen posible explotar un área más pequeña para un mismo volumen.

Intercambiadores verticales en el interior de sondeos

Los intercambiadores de calor se pueden instalar en posición vertical, en el interior de uno o varios sondeos, con profundidades que pueden ir desde cerca de 20 m hasta más de 100 m y diámetros de perforación de tan solo 10-15 cm. Estos dispositivos reciben el nombre de sondeos geotérmicos.

Los intercambiadores de calor situados en el interior de un sondeo habitualmente son tuberías de polietileno de alta densidad o polipropileno en cuyo interior se encuentra el fluido de intercambio térmico. Según su morfología existen diversos tipos de tuberías: en forma de U, en doble U (las más usadas en Europa) y coaxiales o concéntricas (Figura II-14).

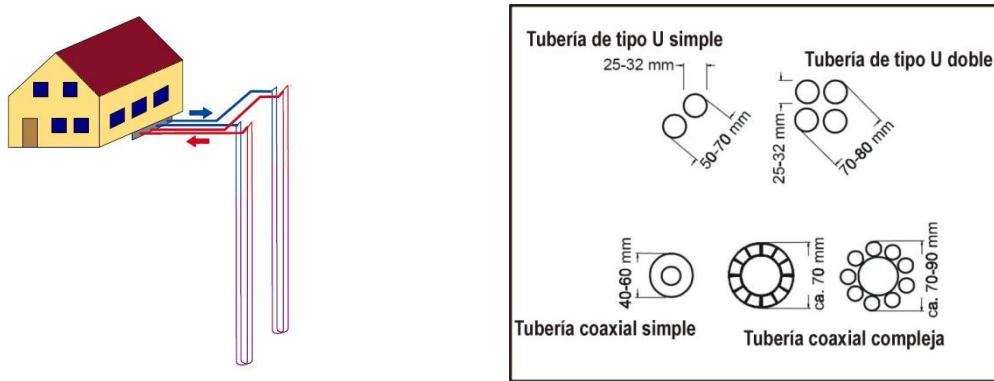


Figura II-14. Sistema cerrado vertical y tipos de intercambiadores de calor
(Mands & Sanner, [www. UBeG.de](http://www.UBeG.de))

Una vez se han introducido las tuberías en el interior del sondeo, se procede a llenarlo de abajo a arriba y evitando la aparición de burbujas de aire, con una lechada densa de cemento que rodee los tubos evitando su deterioro. Esta lechada tiene dos objetivos: en primer lugar, supone un buen material de contacto entre el intercambiador de calor instalado en el interior del sondeo y el terreno circundante, ya que debe presentar una baja resistencia térmica, definida en el diseño. En segundo lugar, evita cualquier movimiento vertical del agua en el interior del sondeo (Eugster & Sanner, 2007). Cabe destacar que, en los países escandinavos, donde frecuentemente se trabaja sobre materiales duros y cristalinos, es una práctica habitual llenar el sondeo simplemente con agua en lugar de lechada, sellando el sondeo en superficie.

Finalmente, la capacidad de las sondas geotérmicas verticales se puede determinar experimentalmente realizando ensayos de respuesta térmica (TRT) en uno o varios sondeos piloto.

Un parámetro clave para el dimensionamiento de un sondeo geotérmico es la potencia de extracción de calor por metro lineal de sonda, y varía generalmente entre 20 y 70 W/m. El número y la profundidad de sondas instaladas dependerán de la potencia requerida y de las condiciones geológicas locales.

II.2.5 El hormigón como elemento intercambiador de calor.

La posibilidad de aprovechar el potencial energético del subsuelo a través de los elementos de cimentación ha comenzado a experimentar en Europa un tremendo

auge en los últimos años. Este tipo de aplicación consiste en la colocación de sondas geotérmicas en elementos estructurales convencionales de cimentación y sostenimiento como muros pantalla, losas, revestimientos de túneles o pilotes. Todos estos elementos formarían el circuito primario de un sistema energético de aprovechamiento geotérmico. Se trata de una solución técnica y económica muy interesante e innovadora, ya que se conjuga la ejecución del intercambio geotérmico con la construcción de las cimentaciones del edificio, evitando tener que realizar a posteriori los pozos de perforación para la instalación geotérmica, con el consiguiente ahorro económico.

Ello permite incorporar una instalación de aprovechamiento geotérmico a la construcción de un edificio o una obra pública como un túnel, un puente, una estación de tren o una carretera. No hay que perder de vista el hecho de que cualquier edificio u obra pública supone necesariamente la instalación de grandes cantidades y superficies de hormigón o cemento en contacto directo con el terreno. Activar térmicamente estas masas de hormigón o cemento mediante la instalación de los elementos anteriormente citados permite extraer energía del terreno circundante, dando con ello un valor añadido a la estructura construida.

II.2.5.1 Geotermia en obras públicas

Se analizarán a continuación los diferentes tipos de obras de ingeniería en las que ha sido posible incorporar instalaciones de aprovechamiento geotérmico como por ejemplo túneles, estaciones de tren y metro, y sistemas de fusión de nieve y deshielo.

Túneles

Los túneles termo-activos permiten obtener una gran cantidad de energía geotérmica que puede ser usada para calentar o refrigerar estaciones de tren, edificios administrativos y residenciales, o mantener plataformas, andenes y puentes libres de nieve y hielo. Obviamente, los túneles más superficiales (especialmente los construidos con el método de falso túnel) permiten un mayor número de aplicaciones debido a que la transferencia de calor entre la fuente y el usuario final es más sencilla por encontrarse más cerca. Los túneles profundos no dejan de ser útiles en los casos en que se encuentre agua subterránea de alta temperatura, aunque ello implica una concepción, diseño y tecnología totalmente diferentes.

Las grandes obras de túneles que atraviesan macizos rocosos drenan las aguas subterráneas que encuentran a su paso al objeto de estabilizar la estructura de las paredes del túnel y mantener saneado el interior de la obra. Estas obras son canalizadas al exterior y vertidas a las redes hidrográficas superficiales más próximas. Sin embargo, en función del espesor del macizo rocoso que recubre el túnel y del gradiente geotérmico de los terrenos atravesados, esas aguas subterráneas pueden constituir un potencial geotérmico importante, alcanzando, como en los grandes túneles de Suiza, temperaturas de hasta 30°C.

Cabe destacar la actividad de investigación llevada a cabo desde el año 2000 en el Institute for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering de la Viena University of Technology en el campo de la instalación de captadores de calor en el seno del hormigón proyectado en las paredes de un túnel. Dentro de este estudio, Adam & Markiewicz (2006) defienden en su artículo las posibilidades de los anclajes, hormigón proyectado y geosintéticos como material soporte en la instalación de captadores. En concreto, los autores describen geocompuestos formados por dos geotextiles no tejidos entre los cuales se instala el sistema de tubos de polietileno de alta densidad conectados en cuyo interior circula el fluido que transportan el calor hasta la bomba. Estos geocompuestos cumplen una función múltiple ya que además de la función de refuerzo y drenaje, trabajan como sistema de explotación geotérmica, ya sea en modo de extracción o de acumulación. La instalación de estos geocompuestos es similar a la de cualquier geotextil no tejido, ya que vienen de fábrica con las sondas geotérmicas embebidas entre las dos capas de geotextil. Únicamente ha de tenerse especial precaución durante la proyección del hormigón y garantizar finalmente la ausencia de cualquier fuga en el sistema.

Los artículos publicados por investigadores de la Universidad de Viena, liderados por el prof. Heinz Brandl, como Adam et al. (2001) o Adam & Markiewicz (2006), describen tres tipos de elementos estructurales que pueden utilizarse para extracción y almacenamiento de energía geotérmica en un túnel (Figura II-15):

- Clavos, clavijas, bulones, anclajes, activados térmicamente
- Geosintéticos, fundamentalmente geotextiles no tejidos y geocompuestos, aunque también pueden usarse geomembranas.
- Revestimientos termo-activos de hormigón proyectado

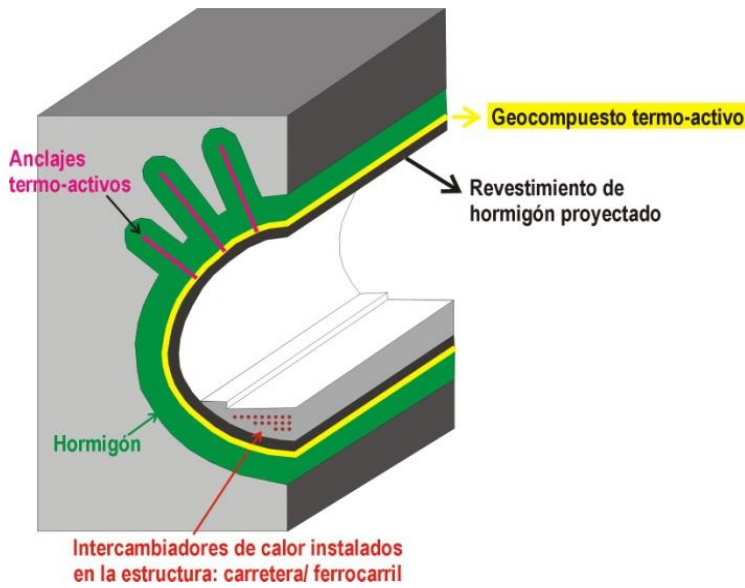


Figura II-15. Esquema de un túnel con anclajes y geocompuestos termo-activos, además de sondas geotérmicas instaladas en la plataforma (de Santiago & Pardo de Santayana, 2009, del original en inglés Adam et al., 2001)

En el campo de aprovechamiento geotérmico en túneles, el caso más destacable es sin lugar a dudas Suiza. La Oficina Federal de la Energía inició en los años 90 del siglo XX un estudio del potencial geotérmico de los túneles que atraviesan los Alpes, estimando un potencial de extracción de calor de 30 MW. Se recogen en la siguiente tabla los más destacados (Wilhelm & Rybach, 2003):

Tabla II-7: Túneles suizos a través de los Alpes con aprovechamiento geotérmico

Nombre	Tipo	Caudal agua (l/min)	T°C del agua (°C)	Capacidad calorífica (kW)
Ascona	Carretera	360	12	150
Furia	Ferroviano	5400	16	3758
Frutigen	Investigación	800	17	612
Gotthard	Carretera	7200	15	4510
Grenchenberg	Ferroviano	18000	10	11693
Hauenstein	Ferroviano	2500	19	2262
Isla Bella	Carretera	800	15	501
Lötschberg	Ferroviano	731	12	305
Mappo-Moretina	Carretera	983	16	684
Mauvoisin	Investigación	600	20	584
Polmengo	Investigación	600	20	584
Rawyl	Investigación	1200	24	1503
Ricken	Ferroviano	1200	12	501
Simplon	Ferroviano	1380	13	672
Vereina	Ferroviano	2100	17	1608

El primer túnel termo-activo construido fue un proyecto piloto de investigación conocido como “Energy tunnel”, ubicado en la línea de ferrocarril que une Viena con el Oeste de Europa, atravesando los bosques de Viena y unos terrenos de complicada geología consistentes en formaciones de Flysch y molasas. Como parte de esta línea,

se ha construido el túnel Lainzer (Figura II-16), que cuenta con intercambiadores de calor que permiten explotar una gran cantidad de energía geotérmica.

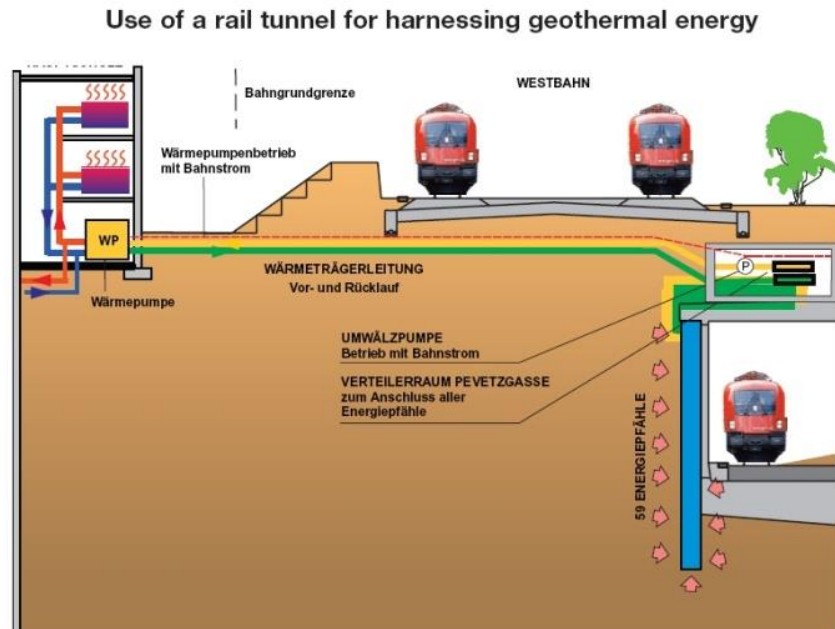


Figura II-16. Sección transversal del túnel Lainzer (www.enercret.com)

El revestimiento exterior del túnel consiste en una pantalla de pilotes de 120 cm de diámetro y 20 metros de longitud, uno de cada tres equipado con captadores geotérmicos. En total el túnel cuenta con 59 pilotes termo-activos con una capacidad calorífica de 100 KW. La extracción anual es de 144 MWh que se utiliza para calentar Hadesdorf Sports Junios High School.

Estaciones de metro y tren

Los aprovechamientos geotérmicos en estaciones subterráneas de metro y tren son muy similares a las de túneles, dado que comparten elementos estructurales que pueden ser activados térmicamente. Como ejemplo de instalaciones geotérmicas en estaciones, cabe destacar el caso de Viena.

En la ciudad de Viena, las obras de ampliación de la línea de metro U2 ofrecieron la posibilidad de incluir en cuatro estaciones de metro instalaciones de obtención de energía geotérmica aprovechando las estructuras en contacto con el terreno. Este

proyecto supone la primera aplicación geotérmica en instalaciones de metro en el mundo. Por esta razón, se instaló un gran número de sensores con el fin de tener completamente monitorizadas las estaciones, incluyendo la temperatura y deformación en las pantallas, en los túneles y 5 metros por debajo de las losas.

Como ejemplo de estación de tren geotérmica, valgan los datos de la estación U2/2-Taborstraße (Figura II-17): refrigerada mediante intercambiadores de calor instalados en 1865 m² de muros-pantalla y 1640 m² en la losa. Fue necesario un volumen de fluido de intercambio de calor (agua con glicol) de 10 m³ cuya temperatura varía entre 10°C y 28°C permitiendo una refrigeración máxima de 81 kW. Se instalaron bandas extensométricas y extensómetros de cadena en las pantallas y debajo de la losa/plataforma, así como sensores de temperatura en ambos lados de las pantallas y en el fluido de extracción y retorno con el fin de investigar la influencia de la explotación térmica en la deformación del terreno y de la estructura.

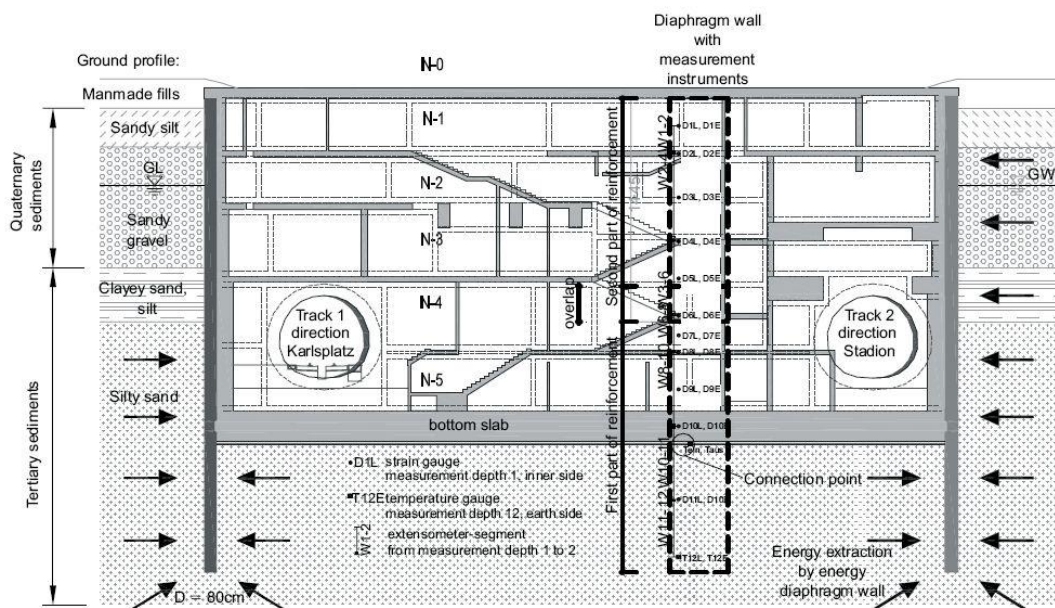


Figura II-17. Sección transversal de la estación de metro U2/2-Taborstraße con pantallas termoactivas. Ubicación de los sensores instalados (Brandl, 2006)

Markiewicz & Adam (2005) describen con todo detalle en su artículo la construcción de estas estaciones de tren geotérmicas, la instalación de las sondas geotérmicas en el interior de las estructuras de cimentación (losas y pantallas), la instrumentación colocada con el fin de controlar en todo momento el comportamiento estructural y térmico del conjunto y la puesta en marcha del sistema.

Fusión de hielo o nieve en aceras, andenes, puentes y carreteras

Durante el invierno, en función de las condiciones climatológicas de la zona, los puentes y carreteras pueden verse cubiertos de nieve lo que puede dificultar o incluso imposibilitar el tráfico. Para evitar situaciones de peligro, es fundamental realizar una cuidadosa labor de mantenimiento. La técnica más generalizada de lucha contra la presencia de nieve o hielo en los pavimentos de carreteras o puentes es la adición de sales. Se calcula que 30 millones de toneladas de sal se utilizan anualmente con este fin (Wang et al, 2008). Sin embargo, este método produce una serie de impactos negativos como la corrosión del hormigón o la contaminación del terreno o agua subterránea (Hutchinson, 1970). La energía geotérmica, incluso de baja temperatura, puede aportar esta labor de mantenimiento desde abajo hacia arriba, utilizando una energía renovable y siempre accesible (EGEC, 2007). En los casos de energía geotérmica de baja y muy baja entalpía, ésta puede ser explotada en un sistema mixto de intercambiadores de calor alimentados mediante energía solar o simplemente mediante bombas geotérmicas (Spitler & Hogue, 1995).

Por otro lado, la presencia de hielo o nieve en áreas peatonales como aceras, andenes de estaciones resulta peligrosa para los transeúntes. Sin embargo, existe la posibilidad de evitarlo mediante una instalación hidráulica geotérmica bajo la superficie del pavimento. Este tipo de instalaciones permiten cumplir los siguientes objetivos (Brandl, 2006):

- Mantener las carreteras, calles o puentes libres de nieve o hielo, reduciendo con ello los posibles riesgos de tráfico para los usuarios.
- Reducir la necesidad de limpieza del pavimento
- Reducir la aparición y desarrollo de roderas en pavimentos de asfalto inducidas por el tráfico pesado y la temperatura
- Evitar el uso de sales o gravilla para fundir el hielo o la nieve. Ello a su vez reduce el impacto ambiental y los costes de mantenimiento.
- Evitar el uso de cadenas en invierno, que erosionan el pavimento por abrasión y aumentan la frecuencia de operaciones de mantenimiento de carreteras. En este sentido valga el ejemplo del cálculo realizado en las carreteras que atraviesan los Alpes. Se estima que es posible un ahorro de hasta un 50% en gastos de mantenimiento en estas carreteras si se evitara el uso de las cadenas. Ello sería posible si se instalaran conducciones geotérmicas bajo el pavimento.

Este tipo de instalaciones, con todas las características descritas hasta el momento, son también aptas para pistas de aeropuertos. En este sentido Sensor (1982) realiza en su tesis un estudio teórico, desarrollando un modelo de fusión de hielo apropiado para calentar pavimentos mediante tuberías de calor (Figura II-18).



Figura II-18. Tablero de puente en Oklahoma State University, Stillwater, E.E.U.U (Llopis y Rodrigo, 2008)

II.2.5.2 La geotermia en la edificación. Las cimentaciones termo-activas

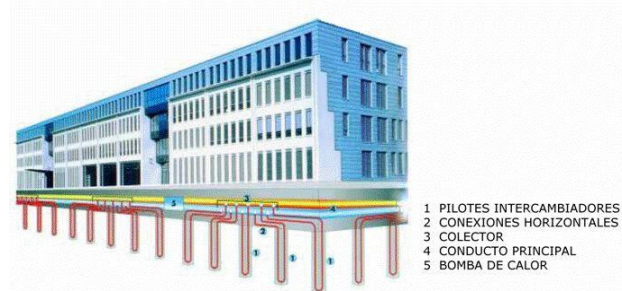
En los casos en que se considere necesario para garantizar la estabilidad de una edificación u obra pública el uso de elementos estructurales como pilotes, pantallas subterráneas, muros de contención o losas, es posible aprovechar tales cimentaciones como soporte de sondas intercambiadoras de calor con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

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 (Mazariegos et al. 2009). Este tipo de cimentación se basa en el aprovechamiento de la temperatura del terreno para aumentar el rendimiento de las “bombas de calor geotérmicas”.

En 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 de un 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 (Figura II-19).

Figura II-19. Esquema de edificio con pilotes geotérmicos (Pahud, 2007)



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 desde entonces han ido aumentando los casos de aplicaciones en zapatas, seguidas posteriormente de pilotes (1984) y muros pantalla (1996) (Brandl, 2006).

Esta innovación, basada en las buenas propiedades del hormigón como almacenador y trasmisor del 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 geotérmicos, también denominados termo-activos.

El diseño de cimentaciones termo-activas 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. La Tabla II-8 enumera estos parámetros de diseño:

Tabla II-8: Parámetros de diseño de cimentaciones termo-activas, además de las condiciones climáticas (Adam & Markiewicz, 2003; Katzembach et al. 2007)

Parámetros geotécnicos y térmicos del terreno	Parámetros estructurales	Parámetros energéticos
<ul style="list-style-type: none"> • Perfil estratigráfico • Propiedades geotécnicas de los diferentes estratos. Densidad, porosidad, permeabilidad • Temperatura máxima, mínima y media anual del subsuelo, gradiente geotérmico • Conductividad térmica y capacidad térmica del suelo • Profundidad del nivel freático, oscilaciones estacionales • Dirección y velocidad del flujo subterráneo • Existencia o ausencia de manantiales cercanos o construcciones subterráneas que desvíen o calienten las aguas freáticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo y dimensiones de cimentación • Profundidad respecto al nivel base • Detalles de la armadura • Requerimientos legales • Espacio disponible para conexión de líneas • Posición del centro técnico de servicio 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda energética: Picos de necesidad energética y distribución mensual de requerimiento de calefacción y refrigeración • Tipo de sistema de calefacción /refrigeración en el circuito secundario (interior del edificio) <p style="text-align: center;">Propiedades del intercambiador</p> <ul style="list-style-type: none"> • Posición y disposición del sistema de captadores en la cimentación • Superficie y volumen del sistema de captación • Diámetro interno y externo del tubo • Material del tubo • Velocidad de flujo o caudal en el interior del intercambiador • Características físicas del intercambiador

II.3 CONCEPTOS DE INSTRUMENTACIÓN

En el proyecto de investigación que se describe ha sido necesario realizar medidas de desplazamientos, deformaciones, tensiones y temperaturas a las que se ha visto sometido el pilote. Para ello, se ha usado una instrumentación clásica consistente fundamentalmente en señores analógicos de tipo flexímetro o reloj comparador, y sensores digitales o transductores, entre los que cabe destacar los extensómetros de cuerda vibrante, galgas extensométricas, LVDT, células de carga y termistores. Paralelamente se han instalado sensores de fibra óptica con el fin de valorar su aplicabilidad en la medida de deformaciones y temperaturas, así como comparar su fiabilidad y eficacia con la instrumentación convencional utilizada.

II.3.1 Medidas de desplazamiento

El desplazamiento es un vector que representa el cambio en la posición de un cuerpo o de un punto respecto a una referencia. Los transductores empleados para medir este parámetro emiten una señal de salida eléctrica proporcional a la posición de su elemento sensor, de tal modo que las variaciones de esta señal se corresponden con desplazamientos.

El transductor de inductancia variable o LVDT (Linear Variable Differential Transformer) es uno de los transductores más utilizados en la medida de desplazamientos, debido a su buena linealidad y resolución. En la Figura II-20 se puede observar el funcionamiento de este dispositivo, que consiste en una bobina en la cual se introduce un núcleo móvil de movimiento solidario con el desplazamiento que se quiere medir (Fraile & García, 1987). Al producirse un desplazamiento experimental se provoca el desplazamiento de un núcleo ferromagnético móvil cuya variación de posición provoca una modificación del coeficiente de autoinducción de una bobina.

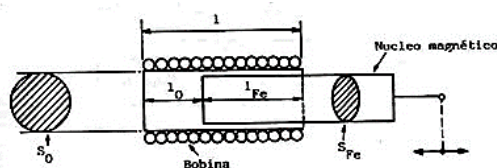


Figura II-20. Esquema de un LVDT (Fraile & García, 1987)

Considerando la distribución del campo magnético uniforme dentro del solenoide (devanado de longitud infinita), el coeficiente de autoinducción L de la bobina (expresada en Henrios) se define como el flujo total que atraviesa la bobina por unidad de corriente y depende de numerosos parámetros:

- Una inductancia L_0 de núcleo de aire o entrehierro
 - de sección S_0
 - Longitud l_0
 - Número de espiras $N \cdot l_0/l$
- Y otra inductancia compuesta de hierro y aire de valor L_{Fe} :
 - de sección S_{Fe}
 - Longitud l_{Fe}
 - Número de espiras $N \cdot l_{Fe}/l$

El desplazamiento ΔL_{Fe} del núcleo de hierro, solidario con el desplazamiento que se desea medir, hace que se produzca una variación lineal ΔL del coeficiente de autoinducción o inductancia.

Ecuación II-23

$$\Delta L = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} (\mu_r - 1) S_{Fe} \cdot \Delta L_{Fe}$$

Donde:

μ_0 es la permeabilidad magnética en el entrehierro

μ_r es la permeabilidad magnética relativa en el núcleo de hierro

N es el número de espiras

l es la longitud del núcleo de hierro

S_{Fe} es la sección del núcleo de hierro

De esta forma el LVDT mide el desplazamiento δ que provoca la carga F en la base superior del anillo, a partir del cual, posteriormente, se determina la fuerza actuante mediante la siguiente relación:

Ecuación II-24

$$\delta = 1,79 \frac{FR^3}{Ewt^3}$$

Donde:

- δ es el desplazamiento que provoca la carga F en la base superior del anillo
- F es la fuerza aplicada
- R es el radio del anillo
- E es el módulo de elasticidad
- w es la anchura del anillo
- t es el espesor de la pared del anillo

En la Figura II-21 se puede observar el esquema de los LVDT's utilizados en este proyecto.

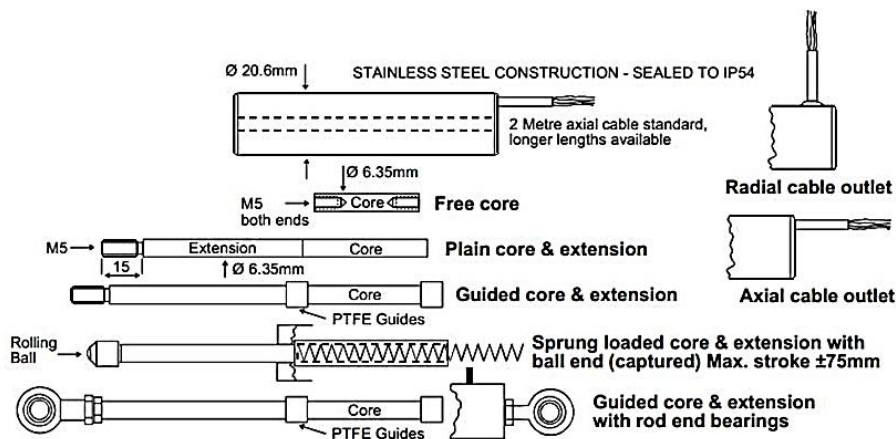


Figura II-21. LVDT empleado

El **flexímetro o reloj comparador** se emplea con mucha frecuencia en ingeniería civil para comparar cotas mediante la medida indirecta del desplazamiento de una varilla o vástago cuyo movimiento es amplificado a través de un mecanismo de engranajes (Figura II-22). Dispone de una esfera, normalmente está dividido en 100 partes, de tal modo que una vuelta completa de la aguja exterior representa 1 mm de desplazamiento del palpador. Para obtener resultados representativos en la medida de desplazamientos con flexímetros es necesario sujetar a estos a una base fija que debe quedar independiente de la estructura observada y con un sistema de apoyo tal que las cargas que actúen sobre la estructura no produzcan movimientos apreciables en la base de sustentación de los aparatos.

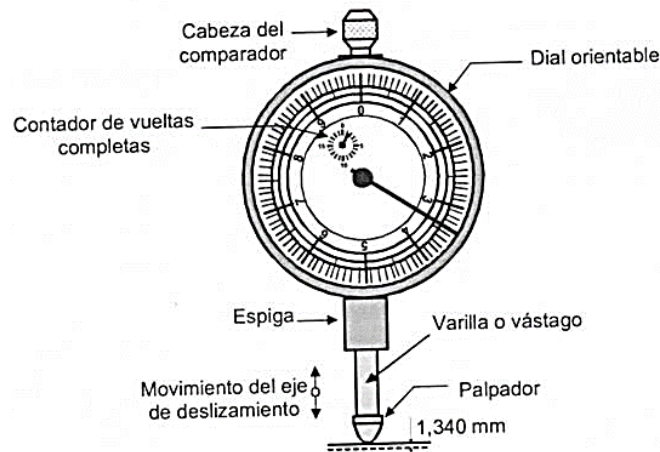


Figura II-22. Comparador o flexímetro (Fraile et al., 2013)

II.3.2 Medidas de deformaciones

Dentro del grupo de instrumentos de medida de deformaciones, los más comúnmente utilizados en obra civil son los extensómetros de cuerda vibrante.

El extensómetro de cuerda vibrante consiste en un hilo de alambre puesto en tensión entre dos anclajes que se fijan a la pieza a medir en los extremos de la base de medida. Toda variación en la distancia entre esos dos puntos debida a la deformación de la estructura produce un cambio en la tensión del hilo, que se traduce en una variación de la frecuencia de sus vibraciones. El principio de funcionamiento se basa en la frecuencia de vibración f de un hilo de longitud L sometido a una fuerza F , definida matemáticamente como:

Ecuación II-25

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{SY}}$$

Donde:

S es la sección del hilo

γ es su peso específico

Debido a la aplicación de una tensión mecánica F/S , el hilo sufre un alargamiento ΔL proporcional a la frecuencia de vibración f resultante mediante un coeficiente de conversión K constante y característico del hilo. Según la Ley de Hooke:

Ecuación II-26

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{4L^2 \gamma}{E} f^2 = K f^2$$

Donde:

K es la constante o coeficiente de conversión del hilo

E es el módulo de elasticidad

Si inicialmente el alargamiento es ΔL_0 y la frecuencia vale f_0 , se tendrá:

Ecuación II-27

$$\frac{\Delta L_0}{L} = K f_0^2$$

Posteriormente, la deformación de la estructura modifica la tensión inicial del hilo, resultando un alargamiento total ΔL_1 con una frecuencia f_1 de tal modo que se cumple:

Ecuación II-28

$$\frac{\Delta L_1}{L} = K f_1^2$$

El alargamiento del hilo debido a la deformación de la estructura será: $\Delta L = L_1 - L_0$

Y de este modo el alargamiento unitario será:

Ecuación II-29

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = k(f_1^2 - f_0^2)$$

Conociendo f_0 y midiendo f_1 con un frecuencímetro se puede determinar la deformación de la estructura.

Si se pretende obtener el valor de microdeformación libre de los efectos de la temperatura, es necesario tener en cuenta el coeficiente de expansión térmica del extensómetro ($12,2 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) y el coeficiente de expansión térmica del material donde va embebido el extensómetro, en este caso, se trata de hormigón y acero ($11 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$). De esta forma, para los cálculos de las deformaciones en el hormigón debido únicamente a variaciones de carga se usa la siguiente expresión:

Ecuación II-30

$$\mu\varepsilon_{\text{debida a la carga}} = K \cdot \left(\frac{f_1^2}{1000} - \frac{f_0^2}{1000} \right) + (T_1 - T_0) \cdot (CF_1 - CF_2)$$

Los extensómetros de cuerda vibrante presentan grandes ventajas como su estabilidad, fiabilidad de funcionamiento en ambientes agresivos, inmunidad al ruido, facilidad de conversión a forma digital, robustez, capacidad de compensación térmica y la posibilidad de automatización, que los hacen muy apropiados en la vigilancia de obras de ingeniería Civil.

En este estudio se utilizaron extensómetros de cuerda vibrante “VWS 2100” de la marca GEOSENSE. Este sensor, de 156 mm, consta de un hilo de acero de 150 mm que permite medir deformaciones de 3000 $\mu\varepsilon$, con un rango de frecuencia de entre 850-1550 Hz. Este extensómetro cuenta además con un termistor asociado, que mide la temperatura absoluta a la que se encuentra el sensor y permite corregir la medida de deformación. Se colocaron 14 Extensómetros de cuerda vibrante con sensores de temperatura incorporados, cada 2 metros en armaduras diametralmente opuestas a lo largo de los 17 m de pilote (Figura II-23).

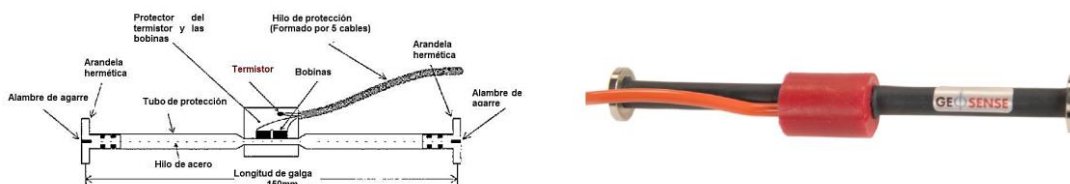


Figura II-23. A) Esquema de extensómetro de cuerda vibrante para embeber en hormigón. B) Extensómetro usado en el ensayo. (www.mgs.co.uk)

II.3.3 Medidas de Fuerza

Los transductores de fuerzas utilizan como sensores primarios elementos elásticos (diafragmas) o cilindros huecos, cuyas paredes experimentan cambios cuando se aplica presión sobre ellas. El rango de presiones de potencial de aplicación es muy diferente, dependiendo de la robustez del elemento sensor:

- Diafragmas apropiados para presiones medias y bajas: 0-210 MPa

- Cilindros para presiones altas y muy altas: 210-700 MPa (células de presión)

En las células de carga o de presión (conociendo el área de la sección del elemento se transforma una magnitud en otra), el sensor es un elemento sólido que al ser sometido a la fuerza que quiere ser medida, sufre una deformación elástica proporcional a la fuerza aplicada según la ley de Hooke. La deformación elástica producida se mide mediante galgas extensométricas o transductores inductivos de desplazamiento (LVDT).

En este estudio se ha empleado una célula de carga de 1,2 MN, cuya sección transversal se observa en la Figura II-24.

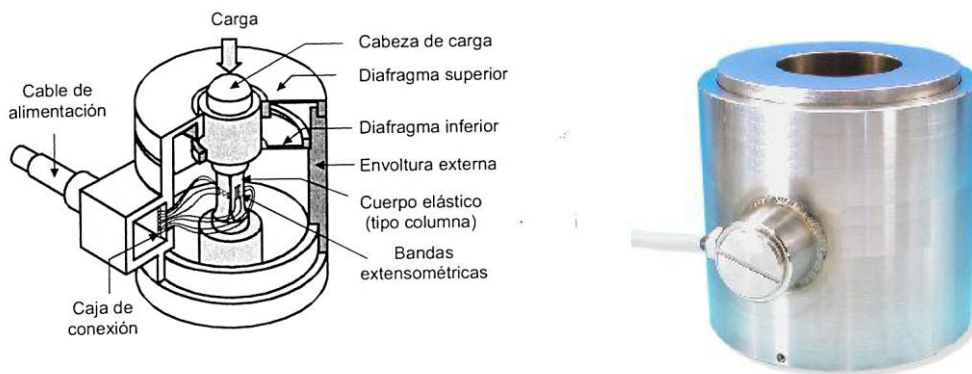


Figura II-24. A) Sección transversal de una célula de carga (Fraile *et al.*, 2013).

B) Célula de carga empleada (www.sensy.com)

Se puede observar en la sección transversal que el sólido elástico que actúa como sensor deformándose es de tipo columna. En ella se han instalado cuatro galgas extensométricas formando una configuración en puente de Wheatstone para medir su deformación. Una vez determinada ésta, conociendo los módulos de deformación del elemento elástico, se calcula la fuerza actuante.

En un puente de Wheatstone, las cuatro galgas, definidas por sus correspondientes resistencias eléctricas son conectadas en serie como se indica en la Figura II-25.

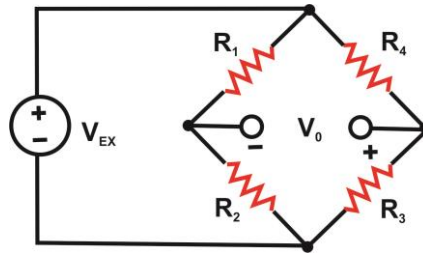


Figura II-25. Puente de Wheatstone

Si inicialmente las cuatro resistencias son iguales: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ se cumple que $R_1/R_2 = R_4/R_3$ y el puente se encuentra en equilibrio. En tales condiciones, variaciones iguales de las resistencias de dos ramas contiguas no desequilibran el puente. Esta propiedad se usa para compensar las magnitudes que influyen en la medida y para la eliminación de las perturbaciones causadas por las variaciones térmicas de las resistencias de los cables de conexión. En este caso la tensión V_{EX} de salida será:

Ecuación II-31

$$V_{EX} = \frac{E_s}{4} \cdot \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{R_0}$$

Cualquier cambio en la resistencia de cualquiera de los brazos del puente resultará en un voltaje de salida diferente de cero.

Las galgas extensométricas dispuestas en puente de Wheatstone permiten determinar la deformación que ha sufrido el elemento sólido elástico. Conocidas la composición, magnitudes, módulo de elasticidad E y módulo de Poisson (ν) del elemento, se determina la fuerza que ha generado la deformación detectada por las galgas.

Al aplicar una fuerza a la barra se producen unas deformaciones axiales (ϵ_a) y transversales (ϵ_t) que vienen expresadas por las siguientes ecuaciones:

Ecuación II-32

$$\epsilon_a = \frac{F}{AE}$$

Ecuación II-33

$$\varepsilon_t = -\frac{\nu F}{AE}$$

Donde A es el área de la sección transversal, E el módulo de elasticidad ν el módulo de Poisson del material.

Entonces, se cumple que la tensión de salida de la célula de carga V_{ex} es proporcional a la fuerza aplicada (F) mediante una constante de proporcionalidad (C) o constante de calibración:

Ecuación II-34

$$F = \frac{2AE}{K(1 + \nu)} \cdot V_{ex} = C \cdot V_m$$

Esta constante de calibración (C) obedece a la expresión:

Ecuación II-35

$$C = \frac{2AE}{K(1 + \nu)}$$

II.3.4 *Medida de temperatura*

De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, la temperatura se relaciona con el calor, ya que se sabe que este únicamente fluye de un foco caliente a un foco frío. La temperatura es un parámetro muy importante en termodinámica, así como en transferencia de calor.

Los termistores son transductores hechos de materiales semiconductores como óxidos de manganeso, hierro, níquel o cobalto, que presentan un alto coeficiente de resistencia negativo. La propiedad fundamental de este tipo de resistencias es una sensibilidad térmica muy superior a las de las resistencias metálicas (del orden de 10 veces). Sin embargo, siendo un termistor un dispositivo semiconductor, cada serie de fabricación tiene su propio coeficiente característico de temperatura y por lo tanto requiere una calibración individual. La relación de la resistencia de un termistor con la temperatura T es:

Ecuación II-36

$$R = a \cdot e^{\beta/T}$$

Donde a y β son constantes determinadas por la estructura del material

Como ya se ha comentado anteriormente, los extensómetros utilizados en este trabajo vienen equipados con un termistor que mide la temperatura en función de la variación de la resistencia (Figura II-26).

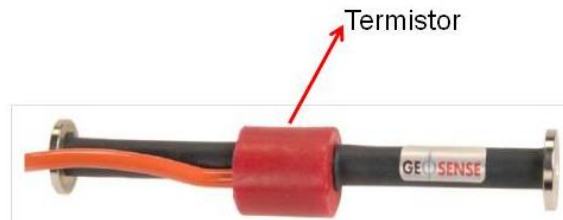


Figura II-26. Extensómetro con termistor incorporado (www.mgs.co.uk)

La temperatura se determina a partir del logaritmo de la resistencia del termistor según la siguiente expresión:

Ecuación II-37

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^2} - 273,2$$

Siendo:

T la temperatura en °C

LnR el logaritmo natural de la resistencia del termistor

A, B y C constantes del termistor empleado, en el caso de este proyecto:

$$A = 1,4051 \cdot 10^{-3}$$

$$B = 2,369 \cdot 10^{-4}$$

$$C = 1,019 \cdot 10^{-7}$$

II.3.5 Equipo multiparamétrico YSI ProPlus

Se trata de un cable sonda para la medida de los parámetros pH, potencial redox (Eh), conductividad eléctrica y temperatura (Figura II-27), construido con un termistor interno que no requiere la calibración. El rango del detector se encuentra entre -5 a +70 °C, con una resolución de 0,01 °C, y una precisión de $\pm 0,15$ °C. El sensor de temperatura de este equipo se empleó para la calibración de los sensores de temperatura de la fibra óptica.



Figura II-27. Equipo YSI proPlus

II.3.6 Sensores de fibra óptica para medida de deformación y temperatura

El nombre de este tipo de dispositivos se debe a que su funcionamiento se basa en la Ley de Bragg. Según esta ley, la incidencia de una radiación electromagnética de longitud de onda λ en un grupo de planos paralelos con una distancia interplanar d , produce un rayo difractado sólo si el ángulo de incidencia θ cumple la siguiente relación:

Ecuación II-38

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Donde:

λ es la longitud de onda del haz incidente

θ es el ángulo de incidencia

d es el espaciado interplanar

n puede ser cualquier valor entero

La red de Bragg suele estar formada por una superficie reflectante sobre la que se han trazado miles de surcos paralelos muy finos separados a una distancia constante y característica d . Al incidir sobre una superficie así, un haz de luz se dispersa en todas las direcciones. Las ondas resultantes, por posteriores interacciones total o parcialmente destructivas, se van anulando y desapareciendo. El único ángulo de dispersión que provocará una interacción totalmente constructiva de las ondas resultantes es el ángulo de difracción o de Bragg que cumple la ecuación anterior. En definitiva, un dispositivo con planos ópticos espaciados una distancia d favorecerá la difracción de una radiación con una longitud de onda λ en un ángulo característico θ . Otra forma de uso es hacer incidir una radiación con múltiples longitudes de onda con un ángulo θ y el espaciado d provocará la difracción de la única longitud de onda λ que cumpla la Ley de Bragg.

Este fenómeno facilita la aplicación dual de las fibras ópticas: como un filtro óptico en línea para bloquear ciertas longitudes de onda, o como un reflector de longitudes de onda específicas. Es capaz de medir deformación, temperatura, aceleración y nivel de agua, se puede colocar en paralelo o en serie. Mide deformaciones de $1\mu\epsilon$ y es de modo único. (Glisic & Inaudi, 2007).

En una fibra óptica una luz emitida hacia la red de Bragg sufrirá una difracción que potenciará una determinada longitud de onda λ . La luz volverá reflejada con una longitud de onda característica de la red de difracción instalada. Si la fibra sufre una deformación o una variación de temperatura, las dimensiones de la red de difracción quedan distorsionadas variando la distancia d original y provocando la difracción de la luz en una longitud de onda diferente de la característica de la red. El cambio de longitud de onda con el que llega la luz reflejada es proporcional a la distorsión de la red de Bragg, que a su vez será proporcional a la variación de temperatura o deformación (Figura II-28).

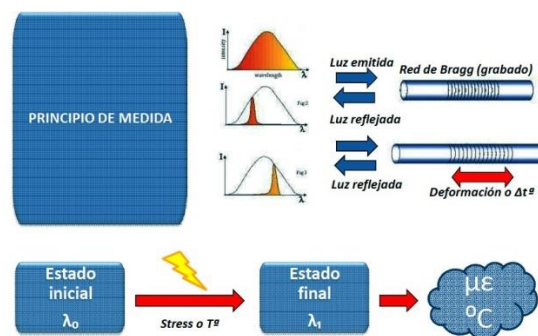


Figura II-28. Principio de medida del sensor de fibra de Bragg (www.alava-ing.es)

En este estudio se utilizaron sensores de fibra óptica os3600 de la casa Micron Optics, de 30,3 cm de longitud (Figura II-29).

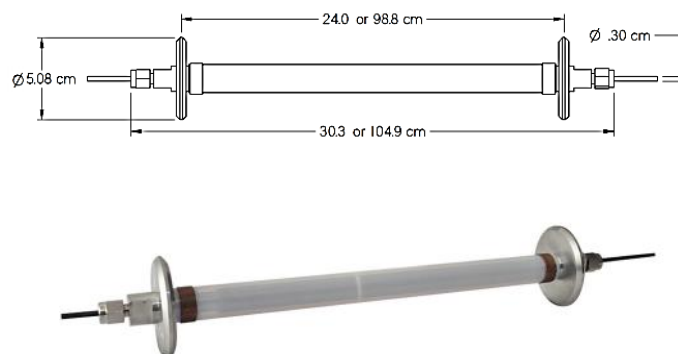


Figura II-29. Perfil del sensor os 3600. (www.micronoptics.com)

Este sensor dispone una segunda red de fibra de Bragg libre localizada en el interior de cada sensor que permite la compensación por temperatura. De esta forma, si se realiza una correcta calibración en laboratorio, bajo condiciones controladas de T (°C), será posible obtener medidas de deformación y temperatura de forma directa y de temperatura. La calibración de estos sensores se ha llevado a cabo como se describe en el capítulo de planteamiento experimental. Si tras la calibración el sensor se monta en una muestra con un coeficiente de expansión térmica distinto, como es el caso del hormigón, se necesita aplicar un coeficiente de corrección para reducir los efectos térmicos. En resumen, este tipo de sensor permite obtener medidas de deformación de forma directa y de temperatura calibrándolos en laboratorio. La temperatura induce deformaciones que son resultado de 2 coeficientes:

- Expansión térmica del sustrato donde la galga está montada
- Los cambios térmicos inducen modificaciones en el índice de refracción en la fibra de Bragg

Los sensores utilizados se caracterizan porque miden deformación corregida por temperatura de forma directa a través de 2 hilos. Las variaciones de temperatura y tensión en la estructura producen variaciones en la longitud de onda de ambos hilos. A partir de los resultados de estos sensores se pueden definir los siguientes conceptos:

Deformación aparente ($\epsilon_{aparente}$): Deformaciones brutas medidas por el hilo 1 del sensor de fibra óptica.

Ecuación II-39

$$\epsilon_{aparente} = \left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right) \cdot \frac{10^6}{F_g} \right]_{deform}$$

Siendo:

F_g : Coeficiente de galga del hilo que mide deformación sin corregir por temperatura (hilo 1), con un valor de 0,777.

λ_0 : Longitud de onda inicial

Deformación térmica libre (ϵ_{thL}): Deformación debida a la temperatura que sufriría el elemento estructural si estuviese libre.

Ecuación II-40

$$\epsilon_{thL} = CTE_s \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_{temp}}{S_t} \right)$$

Siendo:

S_t : Sensibilidad a la temperatura del sensor, en este estudio 23,8 pm/°C.

CTE_s : coeficiente de dilatación térmica de la estructura donde está montado el sensor en $\mu\text{m}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Deformación por cambio en el índice de refracción en el hilo 2 (ϵ_2): Deformación que se produce por cambios en el índice de refracción del hilo debido a la temperatura.

Ecuación II-41

$$\epsilon_2 = C_2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_{temp}}{S_t} \right)$$

Siendo C_2 el coeficiente de dilatación térmica del hilo de fibra óptica; 10,1 $\mu\text{m}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Microdeformación térmica no desarrollada ($\Delta\mu\epsilon_{th}$): Diferencia entre la deformación térmica libre corregida por la variación del índice de refracción del hilo y la deformación observada. Es la deformación que se transforma en tensiones debido a las variaciones térmicas.


Ecuación II-42

$$\epsilon_{th} = \left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right) \cdot \frac{10^6}{F_g} \right]_{deform} - \left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right) \cdot \frac{10^6}{C_1} \right]_{temp} - (CTE_s - C_2) \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_{temp}}{S_t} \right)$$

Siendo C_1 el coeficiente de galga del hilo que mide deformación por temperatura (hilo 2), con un valor de 0,796.

A continuación, se muestra un ejemplo de una hoja de calibración de un sensor de fibra óptica determinado (Figura II-30).

os3600 | Long Gage Strain Sensor

Part # os3600-025-1522/1526-1xx-1yy-E
 Serial # C157691
 Nominal Wavelength, $\lambda_{0,Temp}$ (nm) @22°C 1522.448
 Nominal Wavelength, $\lambda_{0,Strain}$ (nm) @22°C 1526.478
 Certified by: 

Variable	Description	Value	Units
$F_{G, Strain}$	Gage Factor	0.777@22°C	-
C_1	Gage Constant 1	0.796@22°C	-
C_2	Gage Constant 2	10.1	$\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
CTE_s	CTE of Test Specimen	User Defined	$\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
$\Delta\lambda_{Strain}$	Wavelength Shift (Strain)	Interrogated	nm
$\Delta\lambda_{Temp}$	Wavelength Shift (Temp)	Interrogated	nm
S_T	Temperature Sensitivity	-23.8	pm/°C

Strain (mechanically induced $\mu\text{m}/\text{m}$):
 $\epsilon = [(\Delta\lambda/\lambda_0)(1 \times 10^6)/F_G]_{Strain} - \epsilon_{TO}$
 Thermal Output (thermally induced apparent strain, $\mu\text{m}/\text{m}$):
 $\epsilon_{TO} = [(\Delta\lambda/\lambda_0)(1 \times 10^6)/C_1]_{Temp} + (CTE_s - C_2)(1 \times 10^3)(\Delta\lambda_{Temp}/S_T)$

Figura II-30. Hoja de calibración tipo del sensor os3600.(www.micronoptics.com)

CAPITULO III
ESTADO DEL CONOCIMIENTO

III.1 ANTECEDENTES

Mazariegos et al. 2009 define “cimentación termoactiva o termo-activa” como una tecnología aplicable a los elementos de las estructuras de hormigón armado de las cimentaciones como pilotes, pantallas subterráneas, muros de contención o losas, con el fin de aprovechar, mediante bombas de calor geotérmicas, la temperatura del terreno para la obtención de energía para climatización de edificios.

Desde el principio de los años 80 del siglo XX en que se utilizaron por primera vez las cimentaciones termo-activas, la obtención de energía geotérmica a partir de este tipo de estructuras ha ido creciendo, fundamentalmente en Alemania, Austria, Inglaterra y Suiza. En primer lugar surgieron las losas, seguidas de los pilotes termo-activos o geotérmicos (1984) y finalmente, en 1996, se construyen los primeros muros-pantalla (Brandl 2006).

Por lo que se refiere a los pilotes geotérmicos, los primeros estudios se centraron básicamente en su funcionamiento como intercambiador térmico, admitiéndose en un principio que ni su comportamiento estructural (distribución de cargas por fuste y por punta), ni su capacidad portante (resistencia por fuste y por punta del pilote y resistencia del terreno) se verían significativamente afectados por los ciclos de intercambio de calor con el terreno. Desde entonces, la tecnología de los pilotes geotérmicos ha experimentado una rápida expansión en Europa, siendo Austria, Suiza, Inglaterra y Alemania los países más activos en la investigación, tanto básica como aplicada, ejecución, normalización y creación de códigos de análisis numérico. Se resume brevemente a continuación las principales experiencias publicadas en estos países, así como los conocimientos adquiridos a raíz de las mismas.

III.2 EXPERIENCIAS EN DIFERENTES PAÍSES

III.2.1 Pilotes geotérmicos en Austria

En Austria, cerca de 300 edificios se encontraban ya, en 2006, cimentados con pilotes o pantallas energéticas (Brandl, 2006). En la Figura III-1 se muestra la evolución del número de pilotes geotérmicos instalados en este país en el periodo 1984 - 2004.

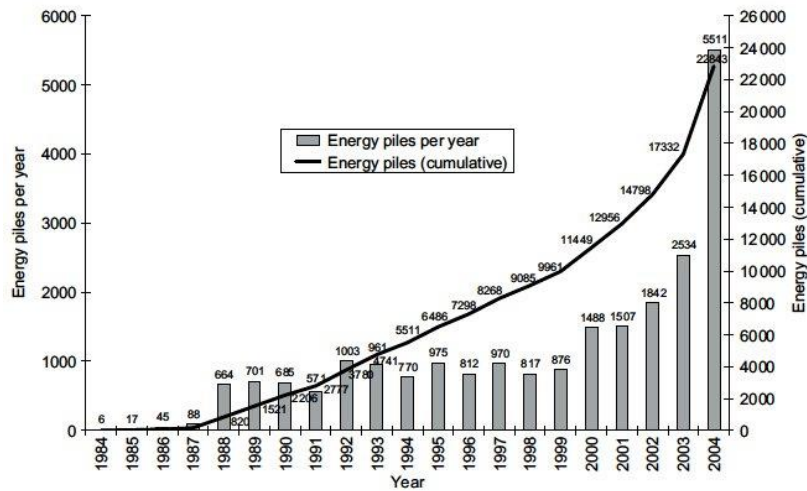


Figura III-1: Número de pilotes energéticos instalados en Austria (Brandl, 2006)

Brandl (2006) describe los resultados obtenidos mediante la instrumentación de un pilote activado térmicamente de la cimentación del centro de Rehabilitación de Bad Schallerbach (Viena). Este edificio se construyó entre los años 1994 y 1995 y consta de siete plantas, dos de ellas subterráneas, con un volumen de 90.000 m³ y una superficie útil de 21.500 m². Dada su localización en una pendiente inestable proclive al deslizamiento, se cimentó con 175 pilotes hormigonados in situ de 120 cm de diámetro y diferentes profundidades, cumpliendo tres funciones geotécnicas diferentes:

- Cimentación del área estadísticamente más crítica
- Como estructuras de contención de la pendiente inestable
- Como muro de contención del foso de excavación de 14 m de profundidad

La profundidad de los pilotes es variable, en función de los requerimientos mecánicos y las características locales del terreno. Así, los pilotes de cimentación tienen una longitud de entre 9 y 11 m, mientras los pilotes que cumplen una función de contención tienen entre 9 y 18 m. La mayor parte de las estructuras de contención están atadas mediante anclajes. De los 175 pilotes excavados, 143 son energéticos, entre pilotes de cimentación y pilotes pertenecientes a estructuras de contención (Figura III-2).

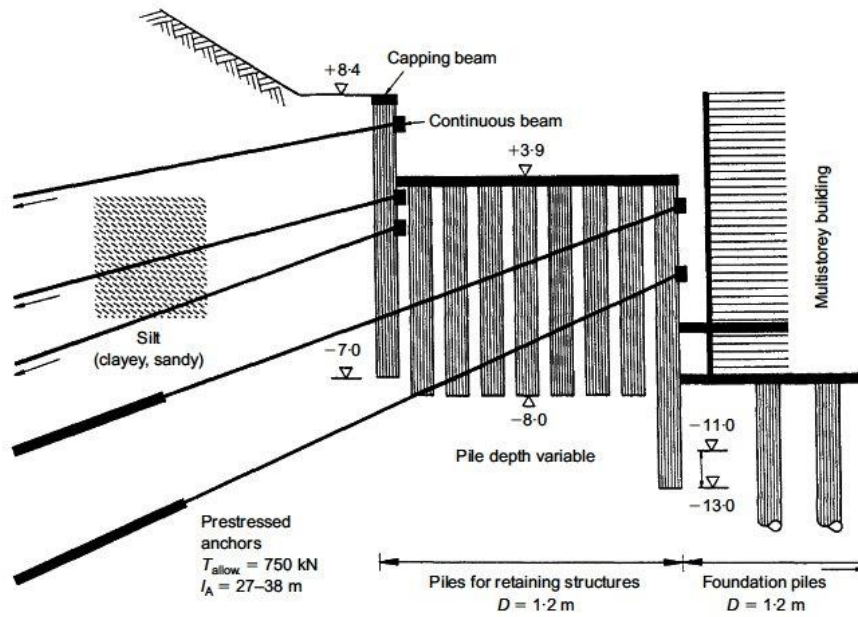


Figura III-2: Vista parcial de la pantalla de pilotes termo-activos anclados, ladera arriba del edificio. (Brandl, 2006)

Para realizar un seguimiento a largo plazo del comportamiento de la geoestructura se instalaron inclinómetros en algunos pilotes, células de presión en las cabezas de los anclajes y manómetros en los tubos de plástico que constituyen el intercambiador de calor. Además, uno de los pilotes fue instrumentado mediante células de presión en pie y cabeza, extensómetros a tres niveles del fuste y medidores de temperatura a cinco niveles diferentes. El objeto de instrumentar más profusamente uno de los pilotes era investigar los efectos de los cambios de temperatura en la capacidad portante y, especialmente en su resistencia por fuste durante la hidratación del hormigón y la posterior extracción de energía. Finalmente, se realizó un seguimiento de las fluctuaciones de la temperatura natural del terreno.

En el siguiente esquema de la cimentación del centro (Figura III-3), los pilotes geotérmicos se representan en negro. Se destaca la localización del pilote instrumentado y los pilotes con inclinómetros y sensores de temperatura. Los pilotes en blanco no están activados térmicamente.

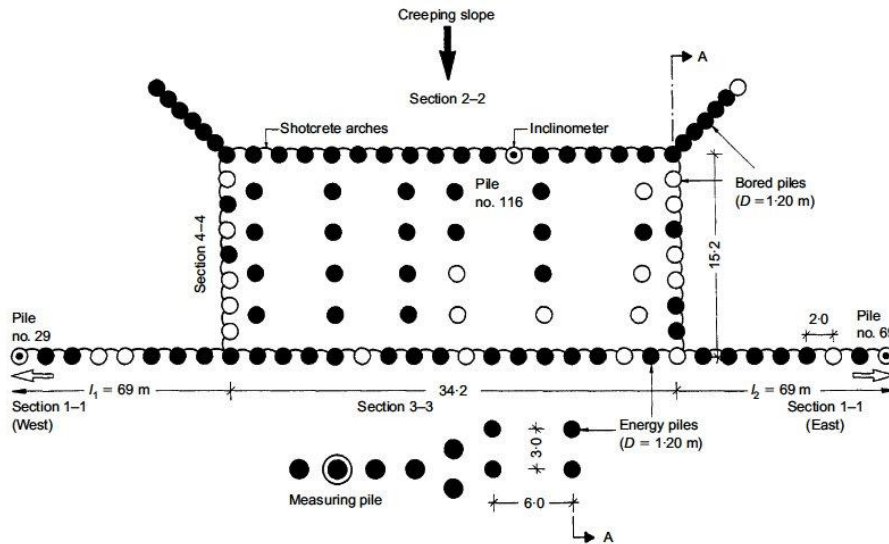


Figura III-3: Cimentación del Centro de Rehabilitación de Bad Schallerbach, Viena. (Brandl, 2006)

La contribución más importante de este trabajo al conocimiento del comportamiento termo-mecánico de los pilotes termoactivos se muestra en la Figura III-4. En ella se distinguen las deformaciones debidas a esfuerzos totales, esfuerzos de compresión generados por las cargas mecánicas y esfuerzos inducidos por las variaciones térmicas en modo calentamiento del edificio. Se observa la influencia evidente de los esfuerzos debidos a las cargas mecánicas, que dominan la parte superior del pilote y disminuyen a medida que aumenta la profundidad. Consecuentemente, la resistencia por fuste en la parte inferior del pilote es considerablemente inferior. La distribución de la fricción por fuste a lo largo del pilote fue calculada a posteriori a partir de las medidas de los sensores, mediante la teoría de la elasticidad de Hooke.

Por otro lado, las deformaciones debidas a cargas de origen térmico se incrementan notablemente con la profundidad, llegando a ser muy importantes en la parte inferior del pilote.

La deformación total generada por la suma de ambas cargas (mecánicas + térmicas) resulta ser considerablemente mayor a la que podría haberse generado únicamente a partir de cargas mecánicas, obviando las cargas de origen térmico.

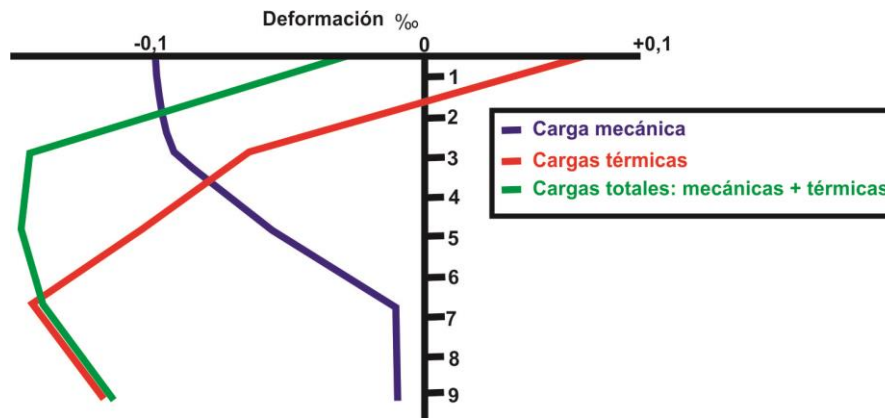


Figura III-4: Deformaciones medidas en un pilote geotérmico entre febrero de 1996 y febrero de 1998, debidos a las cargas mecánicas y a la temperatura (modificado de Brandl, 2006)

III.2.2 Pilotes geotérmicos en Suiza

En la actualidad Suiza e Inglaterra son los únicos países europeos que cuentan con una norma específica de cimentaciones termo-activas. En el caso de Suiza se trata de la norma SIA D-0190 (2005): “Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance” Societe Suisse des ingenieurs et des architectes.”

Dos de los autores de esta norma suiza son Daniel Pahud y Lyesse Labui, en su momento ambos investigadores de la Ecole Polytechnique Federal de Lausana (EPFL), donde se ha llevado a cabo el primer estudio suizo (y segundo europeo) de comportamiento termo-mecánico de pilotes termo-activos en funcionamiento. De hecho, estos dos investigadores, a raíz de los resultados obtenidos mediante la instrumentación de su estudio, han propuesto diversas teorías relacionadas con las variaciones de comportamiento geotécnico del pilote debido a su actividad geotérmica.

En 1998, durante la construcción de un edificio nuevo en la Ecole Polytechnique Federale de Laussane (Suiza), se activó térmicamente uno de los 97 pilotes de la cimentación del edificio, cuyas dimensiones en planta son 100 m de longitud por 30 m de anchura, consistente en 97 pilotes hormigonados in situ de una longitud media aproximada de 25 m. El pilote ensayado, de 25,8 m de longitud y 0,88 m de diámetro, contaba en su interior con un intercambiador de polietileno de alta densidad (PEAD) en forma de U simple. Este pilote fue sometido a dos tipos de solicitaciones: mecánicas y térmicas.

- La carga mecánica fue aplicada por el peso muerto del propio edificio en construcción.
- La carga térmica fue aplicada mediante una bomba que calentaba o enfriaba el agua que entraba en el circuito intercambiador del pilote.

La instrumentación adoptada para la medida de las deformaciones, temperatura y la carga, tanto en pie como en cabeza, constó de 58 sensores (Figura III-5 **Error! Reference source not found.**):

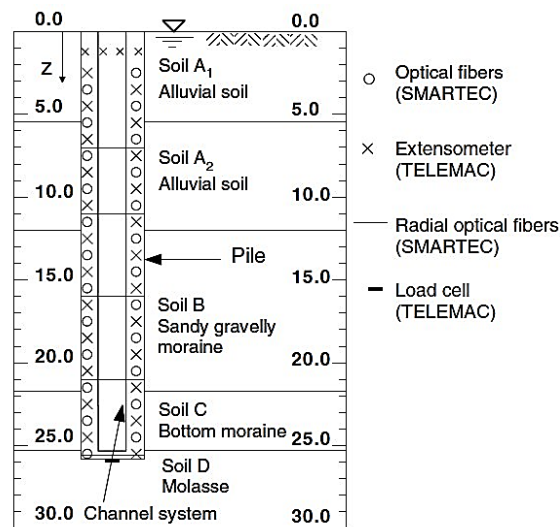


Figura III-5: Instrumentación colocada en el pilote de la EPFL (Laloui et al., 2006)

- 24 extensómetros de cuerda vibrante para medir las deformaciones verticales y la temperatura, colocados a cada metro de pilote alternando con los medidores de fibra óptica.
- 24 sensores de fibra óptica de 1m de largo para medir la deformación vertical.
- 5 sensores de fibra óptica de 2 metros de largo para medir las deformaciones radiales a 5 profundidades: 7, 11, 16, 21 y 25,8 metros de profundidad
- 4 extensómetros de cuerda vibrante en cabeza del pilote para medir deformación vertical y determinar la carga axial en cabeza.
- 1 célula de presión para medir la carga en el pie del pilote

Las solicitaciones mecánicas y térmicas se alternaron con el fin de observar claramente el acoplamiento existente entre ambas. Así, se aplicaron ciclos térmicos controlados tras finalizar la construcción de cada planta del edificio. De esta forma se

realizaron 7 ensayos sucesivos. En la Figura III-6 se puede observar la historia termo-mecánica del estudio: El ensayo 0 corresponde al momento de hormigonado del pilote. El ensayo 1 se realiza previamente al inicio de la construcción del edificio, momento en que se aplica un ciclo térmico al pilote y no existe carga mecánica que restrinja su movimiento. En los ensayos posteriores, el pilote tenía restringido el movimiento vertical debido al peso muerto del edificio construido. Las restricciones de movimiento sucesivamente mayores a medida que se construyen plantas del edificio, generan tensiones internas en el pilote, que no puede deformarse libremente. De esta forma se genera una carga axial adicional de origen térmico. En el primer ensayo la diferencia de temperatura fue de 22°C, y de 15°C en el resto.

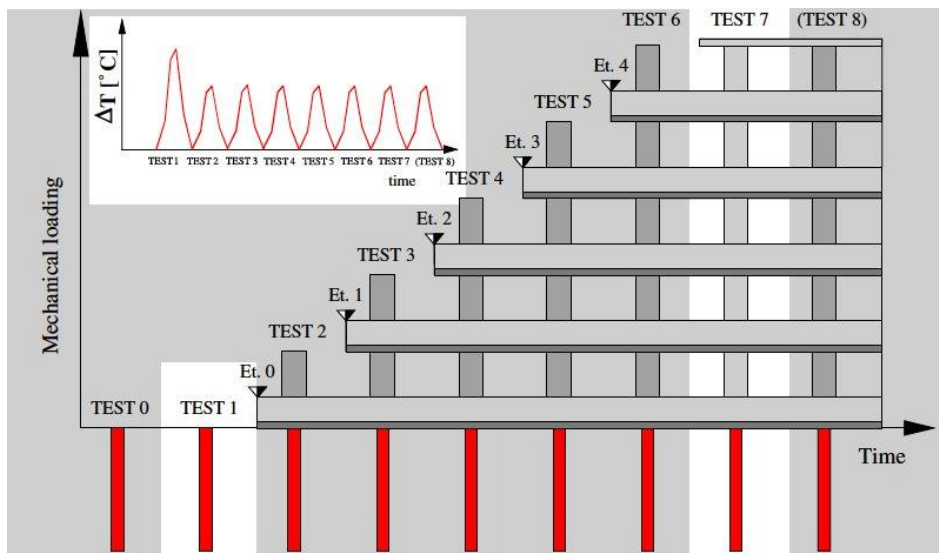


Figura III-6: Secuencia de cargas termo-mecánicas en el ensayo (Laloui et al., 2006)

De los numerosos datos obtenidos del comportamiento del pilote, se han estudiado diferentes fenómenos, entre los que destacan:

- Deformaciones axiales de origen térmico en el pilote
- Levantamiento de la cabeza del pilote
- Cargas axiales inducidas
- Fricción lateral del pilote

Este ensayo ha supuesto un gran avance en el conocimiento del comportamiento termo-mecánico de pilotes (Laloui et al., 1999; 2003; Laloui et al., 2006; Laloui & Nuth,

2009; Peron et al., 2011). En primer lugar, confirman la tesis propuesta por Brandl (2006) referente a que las variaciones térmicas sufridas por el pilote durante su explotación como elemento termo-activo, pueden provocar tensiones internas que deben ser tenidas en consideración en el estudio geotécnico de la cimentación.

Además, describen en sus publicaciones cómo la aplicación de cargas térmicas genera deformaciones en el pilote que resultan no ser uniformes y dependen fundamentalmente del rozamiento del pilote con el terreno que lo rodea.

De hecho, los resultados parecen demostrar que la deformación es diferente a diferentes profundidades en función del estrato atravesado.

De cualquier forma, la representación de las deformaciones durante un ciclo de calentamiento-enfriamiento (Figura III-7) indica que el comportamiento es elástico-lineal, es decir, los desplazamientos sufridos por el pilote con respecto al suelo no alcanzan el umbral a partir del cual el rozamiento impide al pilote volver a su situación original.

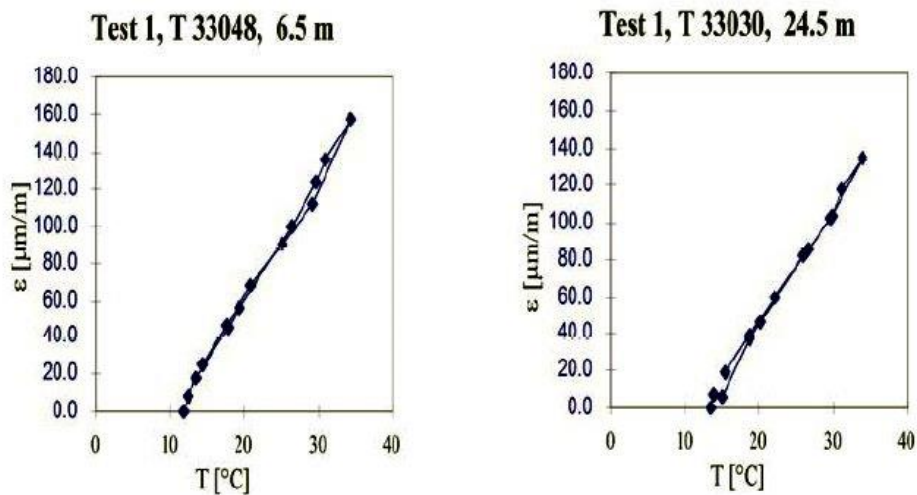
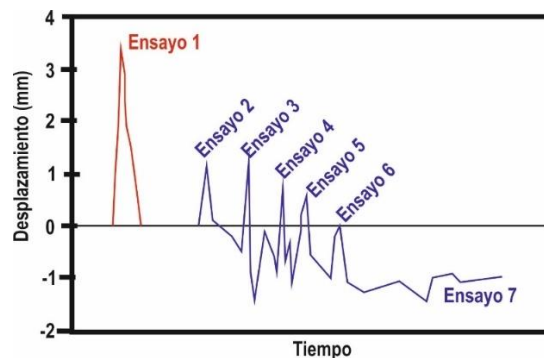


Figura III-7: Evolución de las deformaciones (ϵ , $\mu\text{m/m}$) durante un ciclo térmico a dos profundidades del pilote: 6,5 m (izquierda) y 24,5 m (derecha) (Laloui, 2011)

El ensayo 1, sin ninguna carga mecánica aplicada, permitió medir el máximo levantamiento posible originado por la expansión del pilote ante una diferencia térmica de 22°C.

A continuación, tras la construcción de la primera planta del edificio, se realizó el ensayo 2, con una diferencia térmica de 14°C. La rigidez introducida por el peso de la estructura bloqueó parcialmente el movimiento del pilote. La Figura III-8 muestra las variaciones de desplazamiento del pilote a medida que se iba construyendo el edificio y se observa cómo la carga muerta, sucesivamente mayor en cada ensayo, restringía cada vez más el movimiento de expansión, aumentando con ello la carga en el pilote.



**Figura III-8: Desplazamiento vertical del pilote en los siete ensayos del estudio
(Modificado de Laloui, 2011)**

Los resultados obtenidos muestran que una diferencia de temperatura de 14°C provocó una carga axial adicional del orden de 1.200 kN en el extremo superior del pilote, con un máximo de 2.000 kN en el límite superior del estrato B. En términos generales, según los responsables de este estudio, un incremento de temperatura de 1°C supone aproximadamente un aumento de 100 kN (Boënnec, 2009)

En resumen, de igual manera que afirmó Brandl (2006) tras el estudio del Centro de Rehabilitación vienés, el estudio del pilote termoactivo de EPFL permite deducir que la carga mecánica es muy importante en la parte superior del pilote y disminuye con la profundidad. Por el contrario, la carga térmica es mayor y más uniforme, actuando con mayor presencia en el pie del pilote. En consecuencia, la carga total resultante de la suma de cargas mecánicas y térmicas representa el doble de la carga puramente mecánica, ejerciendo un fuerte impacto en el pie del pilote (Figura III-9).

Este estudio ha dado pie a numerosas publicaciones, siendo Laloui, et al. (1999) y Laloui, et al. (2003) las más importantes, así como el desarrollo de un modelo matemático y un programa de modelación de pilotes termo-activos por parte del equipo de investigación de la EPFL, encabezado por el profesor L. Laloui: "Thermopile". Este programa permite el cálculo teórico de la deformación que sufre un

pilote aislado bajo carga térmica y mecánica. Una limitación de este novedoso software es que no permite analizar el efecto sobre un grupo de pilotes.

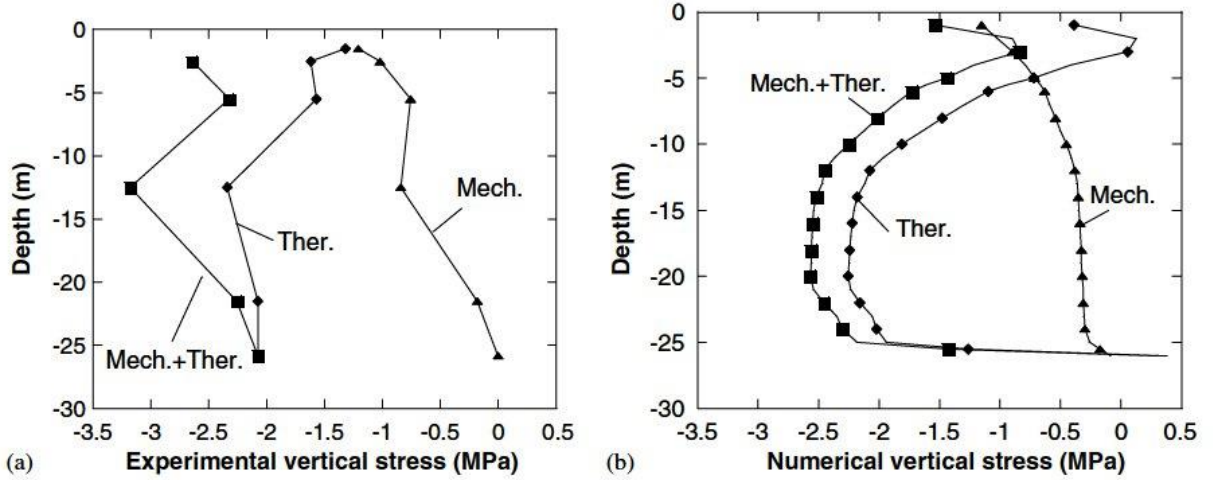


Figura III-9: Distribución de esfuerzos de origen mecánico, térmico y combinado a lo largo del pilote a) datos experimentales b) simulación numérica (Laloui et al., 2006)

III.2.3 Pilotes geotérmicos en Inglaterra

El gran desarrollo de los pilotes geotérmicos en Inglaterra (Figura III-10) se debe fundamentalmente a la asociación de Geothermal International y la empresa de construcción sueca SKANSKA Cementations. Su colaboración ha dado lugar a numerosos ejemplos en Inglaterra a lo largo de los cuales han ido desarrollando y mejorando la tecnología en diferentes tipos de pilotes.

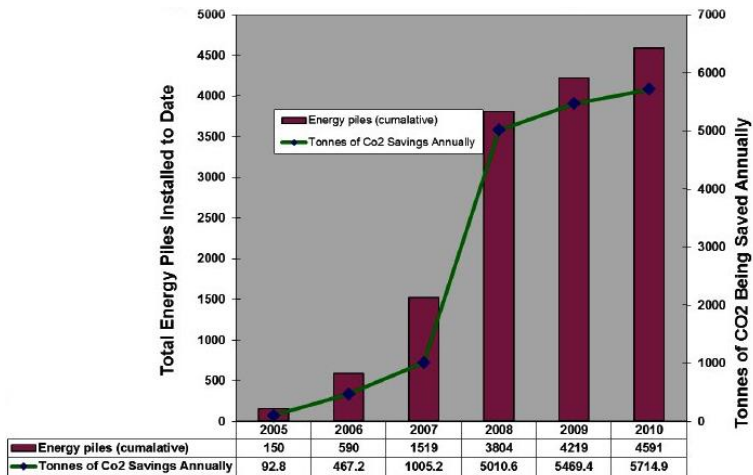


Figura III-10: EnergyPiles® instalados en Inglaterra (Amis, 2011)

En la actualidad existe una norma específica sobre pilotes geotérmicos: “Thermal Pile Standards: Design, Installation & Materials” (GSHPA, 2012). Según esta norma, el objetivo principal del diseño de pilotes geotérmicos debería ser cuantificar las cargas térmicas y, posteriormente, aplicar factores de seguridad que se usan habitualmente en el diseño habitual de pilotes. Los autores del texto de la norma no ven necesario modificar los factores de seguridad existentes. Uno de los precursores de esta norma, aparte de los citados anteriormente, es el profesor de la Universidad de Cambridge Kenichi Soga, investigador que ha realizado dos estudios sobre pilotes geotérmicos hormigonados in situ totalmente instrumentados, en Lambeth College y Bankside, ambos emplazados en Londres.

III.2.3.1 Lambeth Collegue

Es un caso muy interesante que ha dado lugar a numerosas publicaciones con diversas conclusiones y correlaciones que abren preguntas y ofrecen teorías sobre el efecto de las cargas térmicas en el comportamiento mecánico de los pilotes geotérmicos (Bourne-Webb et al., 2009; Ouyang et al., 2011).

El caso que se analiza se encuentra en la cimentación del Centro Clapham del Lambeth College (Figura III-11), en el extremo sureste de Clapham, al sur de Londres (Inglaterra). Compuesta por 145 pilotes barrenados de 600 mm de diámetro nominal, todos ellos activados térmicamente, de longitudes variables, con un promedio de 19m, se aprovecha la cimentación para instrumentar un pilote y así poder realizar un seguimiento del comportamiento del mismo

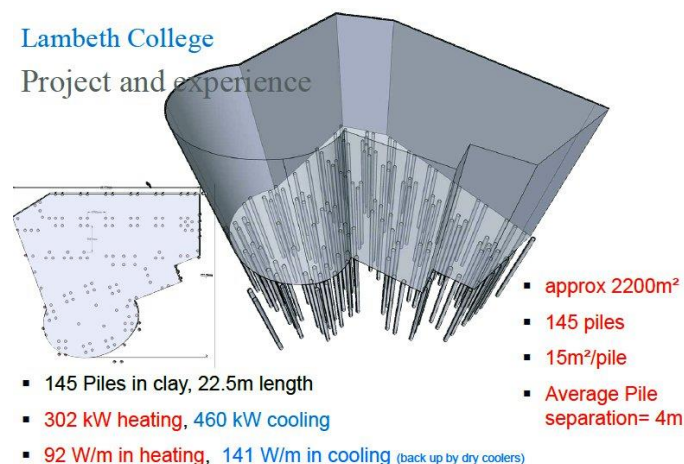


Figura III-11: Datos del proyecto de Lambeth College (Faber Maunsell/AECOM, 2009)

El ensayo consiste en 6 elementos: el pilote del ensayo, un pilote sumidero de calor, 4 pilotes que sirven como anclajes para la aplicación de la carga mecánica necesaria al pilote de ensayo y un sondeo a una distancia de 0,5 m para medir la evolución de las temperaturas a esa distancia (Figura III-12).

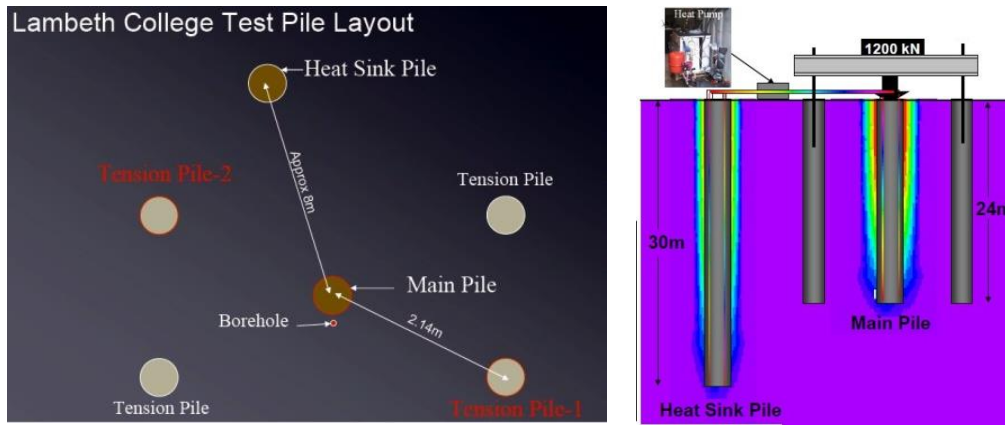


Figura III-12: Esquema del estudio realizado en Lambeth College. Bourne-Webb, et al. (2009)

El pilote de ensayo tiene una longitud de 23 m, con un diámetro de 600mm. La Figura III-13 permite localizar los sensores instalados en el pilote y el sondeo adyacente, perforado a 0,5 m del pilote e instrumentado con un sistema de termistores para medir el perfil térmico en profundidad. De igual forma, se instalaron extensómetros de cuerda vibrante a diferentes profundidades con el fin de medir las deformaciones ocasionadas.

La instrumentación usada en el pilote es la siguiente:

- 18 extensómetros de cuerda vibrante, a 6 niveles, 3 por nivel. Los extensómetros se colocaron cerca de cambios de estrato o cambios en la sección del pilote.
- Sensores de fibra óptica se usaron también para medir la deformación radial a 9 y 14 metros de profundidad.
- 6 termistores, cada uno colocado al nivel de cada uno de los seis extensómetros. De esta forma, las medidas de los extensómetros podían ser corregidas por efecto de la temperatura en los seis niveles.

Como en los casos anteriores, el principal objetivo de este estudio consistió en comprobar si las variaciones de temperatura tenían efectos en la capacidad estructural del pilote. Se resumen a continuación las conclusiones más importantes obtenidas.

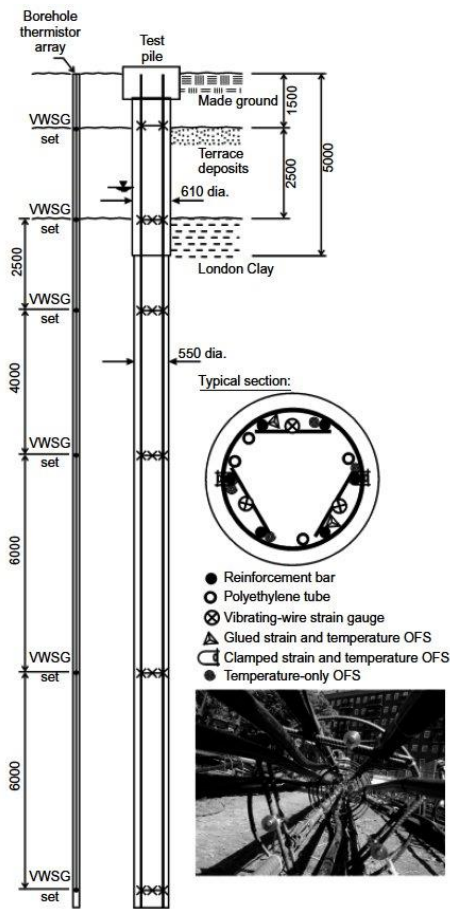


Figura III-13: Instrumentación instalada en el pilote (Bourne-Webb et al., 2009).

OFS: *Optical Fiber Sensor*: Sensor de fibra óptica

VWSG: *Vibrating-Wire Strain Gauge*: Extensómetro de cuerda vibrante

El efecto combinado del ciclo térmico junto con la carga mecánica aplicada generó un rango de movimientos en cabeza de entre 2,8 mm en modo calentamiento y 4,4 mm en modo enfriamiento. Los autores consideran que estos valores resultan aceptables al encontrarse dentro del coeficiente de seguridad utilizado (2,5).

La funcionalidad del pilote parece no verse afectado significativamente durante los ciclos geotérmicos. Sin embargo, cuando el pilote se somete a enfriamiento, la deformación compresiva resultante es inferior a lo que correspondería según su coeficiente de dilatación térmica. Esta diferencia da lugar al desarrollo de fuerzas internas de tracción en el pilote. Por otro lado, cuando el pilote es sometido a ciclos de calentamiento, la dilatación resultante es menor a la que correspondería, generando fuerzas internas de tipo compresivo, de mayor magnitud en la parte superior del pilote.

En la Figura III-14 se puede observar la variación de la deformación registrada a diferentes profundidades en función de los cambios de temperatura. Los datos se ajustan perfectamente a una tendencia lineal, lo que indica un comportamiento termo-

elástico del pilote. Además, se determinó el coeficiente de expansión térmica del pilote: $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/}^{\circ}\text{C}$, que se encuentra en el rango de valores típicos (de 6 a $9 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/}^{\circ}\text{C}$) del hormigón utilizado.

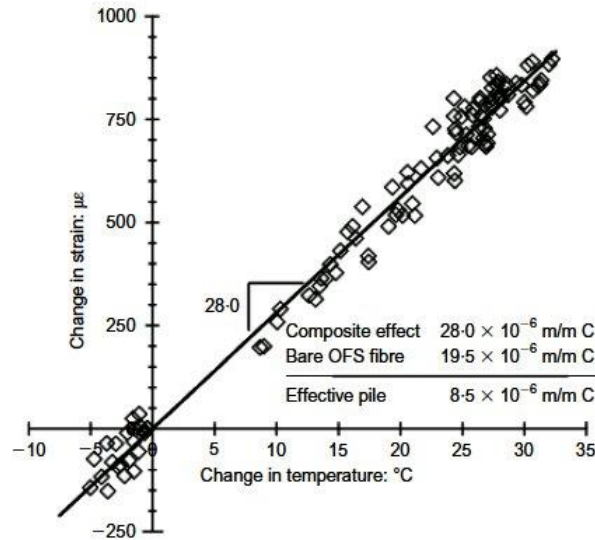


Figura III-14: Evaluación de la respuesta térmica efectiva del pilote de Lambeth College (Bourne-Webb et al., 2009)

Se muestran en la Figura III-15 los movimientos de la cabeza del pilote durante todo el periodo del ensayo térmico realizado, incluyendo las dos pruebas de carga, al inicio y al final del mismo. Se observa en primer lugar, que el pilote asienta bajo la aplicación de la carga de 1.200 kN en las dos pruebas de carga realizada. El desplazamiento es similar en ambos casos. Tras la primera prueba de carga y durante el periodo de enfriamiento, se producen pequeñas fluctuaciones debido a las expansiones y contracciones diarias del pilote y el marco de reacción.

El movimiento registrado del pilote resultó ser del 60% del valor teórico de contracción y del 40% del valor teórico de expansión. Estos datos confirman que el pilote no se está comportando como una columna libre, donde se genera un perfil de deformación uniforme por efecto de los cambios de temperatura. El terreno circundante al pilote modifica su respuesta térmica, dando como resultado una distribución de deformación no uniforme a lo largo del pilote. Lamentablemente, el registro de datos tuvo que cortarse inmediatamente después de la segunda prueba de carga, para permitir la continuación de los trabajos de construcción. Debido a esta razón, se ha perdido la posibilidad de medir posibles movimientos permanentes del pilote tras la segunda

prueba de carga. Los autores recomiendan esperar un cierto tiempo tras aplicar una carga mecánica antes de aplicar el ciclo de cargas térmicas e, igualmente, permitir al pilote recuperarse de este ciclo antes de aplicarle cualquier otra carga mecánica.

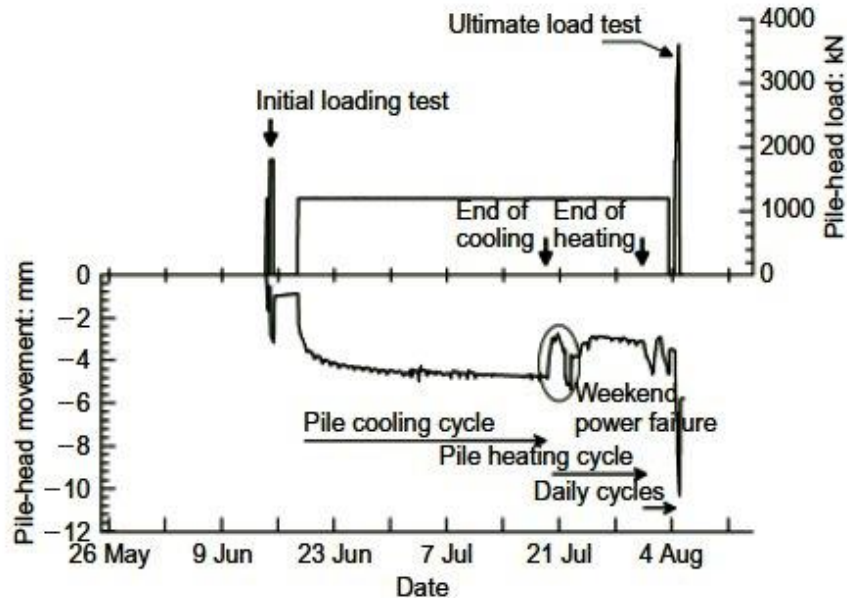


Figura III-15: Control de carga y desplazamiento de la cabeza del pilote de Lambeth College a lo largo del ensayo (Bourne-Webb et al., 2009)

En general, el comportamiento del pilote ha resultado ser termo-elástico, como ya sugirió Laloui et al. (2006), y los efectos tenso-deformacionales sufridos por la contracción/expansión del pilote han resultado ser reversibles al invertir el ciclo térmico.

III.2.3.2 *Bankside Londres*

La información obtenida en el estudio de Lambeth College resultó ser muy limitada e insuficiente para los objetivos planteados por el equipo de investigación, que pretendía analizar cómo responde la estructura a los ciclos de calentamiento y enfriamiento a medio-largo plazo. Por esta razón, actualmente en la Universidad de Cambridge se está llevando a cabo un proyecto de investigación de un pilote que va a estar sometido a ciclos de enfriamiento y calentamiento durante 25 años. Hasta el momento, el pilote lleva activado 3 años.

El proyecto consiste en un complejo residencial compuesto por cuatro edificios de múltiples plantas (entre 6 y 24) que albergan un total de 197 apartamentos y áticos, así como 1.044 m² de comercios a pie de calle. Alrededor del perímetro del complejo residencial, Cementation Skanska construyó una pantalla de pilotes secantes mediante barrenado para crear un sótano. De los 176 pilotes que forman la pantalla, 130 fueron activados térmicamente. En este caso, los pilotes alcanzan una profundidad máxima de 50 m. Ello convierte a este proyecto en el primero y más profundo sistema geotérmico basado en pilotes en toda Inglaterra hasta la fecha. Actualmente se están estudiando 3 pilotes, dos de 30 metros, sometidos a una carga mecánica de 4.650 y 700 kN respectivamente, y uno de 50 metros bajo una carga mecánica de 13.000 kN.

En la Figura III-16 se muestra un esquema de la instrumentación utilizada en este proyecto. En total hay 3 pilotes instrumentados con fibra óptica y galgas de deformación para la medida de deformación y temperatura, junto con instrumentación tradicional, extensómetros con termistores incluidos.

Este proyecto tiene dos objetivos fundamentales: por un lado, desde un punto de vista energético, observar la eficiencia en la extracción de la energía, así como la variación de las propiedades térmicas del suelo a largo plazo. Por otro lado, a nivel geotécnico, y dado el gran diámetro de los pilotes estudiados, el proyecto persigue varios objetivos:

- Realizar un seguimiento de los efectos a largo plazo en las cargas que sufren los pilotes debidos al calentamiento y enfriamiento cíclicos durante 25 años.
- Observar la influencia de la extracción energética en las propiedades del suelo y en las estructuras adyacentes.
- Observar si la deformación radial del pilote (de gran diámetro) será mayor que en pilotes de diámetro menor.
- Analizar las variaciones de carga por fuste a las que el pilote estará sometido a lo largo de los 25 años. Se esperan unas variaciones de carga mayores que en pilotes térmicos con menor diámetro.

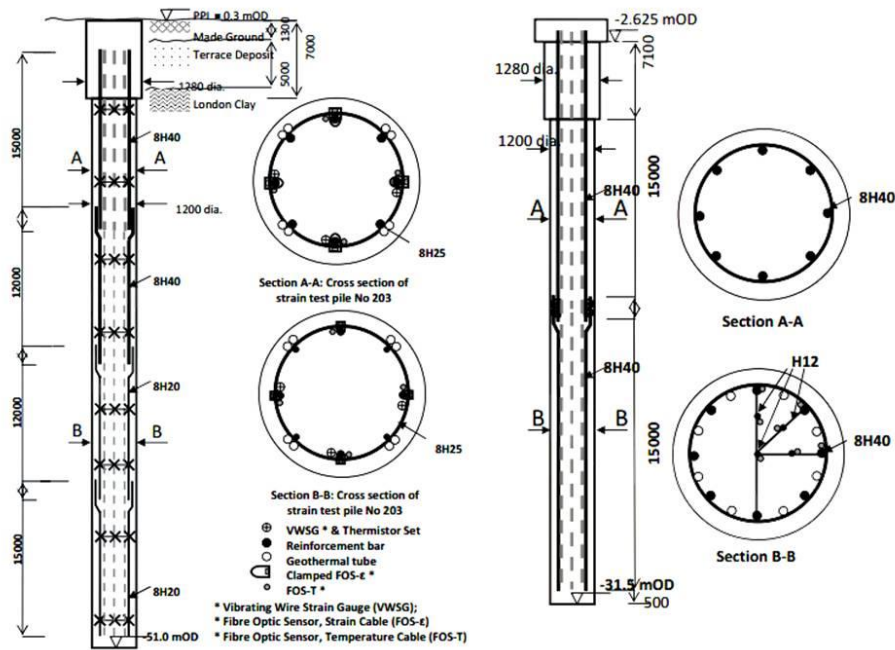


Figura III-16: Detalles de la instrumentación en el complejo Bankside (Ouyang, 2011a)

Por el momento no se han encontrado publicados resultados de este ensayo.

Paralelamente a este proyecto, se está desarrollando en la Universidad de Cambridge un programa informático que permita evaluar la interacción entre los pilotes mediante soluciones elásticas (Figura III-17). La ventaja de este programa sobre el creado por el equipo suizo, es que “Thermopile” presenta la limitación de modelar únicamente un pilote aislado, no permitiendo analizar la interacción de un conjunto de pilotes.

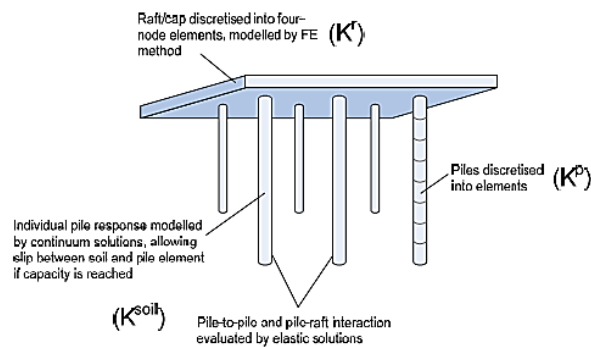


Figura III-17: Detalle del programa de diseño de pilotes geotérmicos (Ouyang, 2011b)

III.2.4 Pilotes geotérmicos en Estados Unidos

En Estados Unidos la investigación en el campo de pilotes termoactivos ha empezado más tarde que en Europa, pero con mucha fuerza. Destacan en el panorama americano el grupo liderado por C. Guney Olgun en el Department of Civil and Env. Engineering de Virginia Tech y las líneas de investigación lanzadas por el prof. John McCartney en la University of California, San Diego.

III.2.4.1 Actividad en Virginia Tech

El Department of Civil and Env. Engineering de Virginia Tech, liderado por C. Guney Olgun lleva realizando en los últimos años diversos campos experimentales de pilotes termoactivos de diferentes longitudes, diámetros, diseño térmico y disposición geométrica, totalmente instrumentados, con el fin de analizar su comportamiento térmico, geotécnico y la interacción creada por la acción solapada entre varios de ellos (Olgun et al., 2012; Ozudogru et al., 2012). En la Figura III-18 se muestra la disposición de uno de estos campos, en el campus de Virginia Tech, que consta de cinco pilotes hormigonados in situ, de 25 cm de diámetro y 30,5 m de profundidad. De los cinco pilotes, dos están instrumentados con sensores de deformación y temperatura. Se han perforado además diversos sondeos de profundidades comprendidas entre 18 y 36 m como puntos de observación durante los ensayos térmicos realizados.

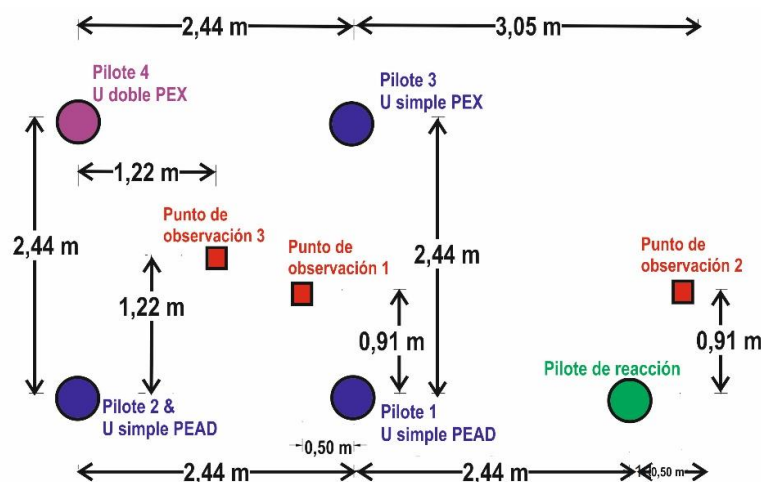


Figura III-18: Campo de ensayos GEP (Modificado de Olgun et al., 2012)

En este campo se realizaron en 2011 ensayos de respuesta térmica siguiendo las especificaciones de la guía American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE (Kavanaugh et al., 2001). Posteriormente se llevaron a cabo ensayos de comportamiento termo-mecánico. Para ello, se aplicó sobre el pilote 1 una carga de 1330 kN mediante gato hidráulico y un bastidor de reacción anclado con dos pilotes (pilote de reacción y pilote 2). Con esta carga mecánica mantenida, se aplicaron ciclos de calentamiento y enfriamiento del pilote durante dos semanas mientras se registraba el comportamiento del pilote mediante la instrumentación adecuada.

En la Figura III-19 se muestra la variación de la temperatura de entrada en el pilote a lo largo del ensayo. Las variaciones térmicas del pilote provocan el desarrollo de deformaciones internas. En la Figura III-19 se representan estas deformaciones registradas a lo largo del pilote mediante la instrumentación con respecto a las variaciones térmicas que las provocan.

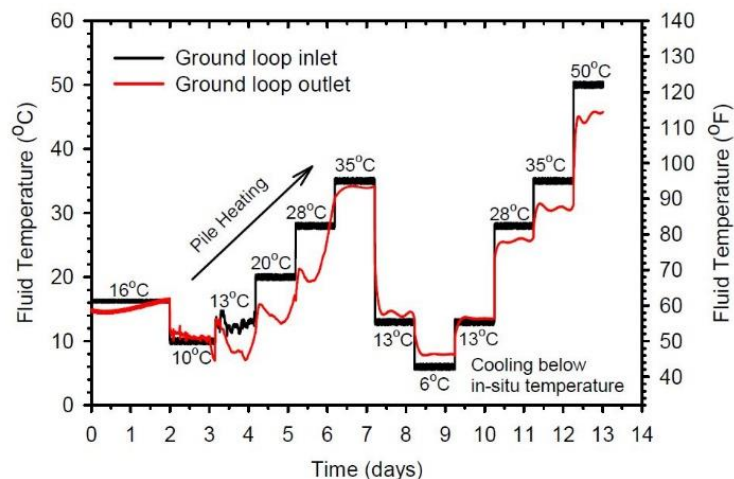


Figura III-19: Temperatura de entrada en el pilote durante el ensayo termo-mecánico (Olgun et al. 2012)

Posteriormente se determinan las tensiones a lo largo del pilote durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Como se puede observar en la Figura III-20, parte de la carga aplicada al pilote antes del ensayo térmico es transmitida a lo largo de los primeros metros de pilote (arena-limosa (SP-SM)), y se transfiere al terreno en el inicio de las pizarras (shale). Se observa un incremento sustancial de la carga que sufre el pilote durante los ciclos de calentamiento, mientras que el enfriamiento del mismo puede llevar a generación de cargas de tracción.

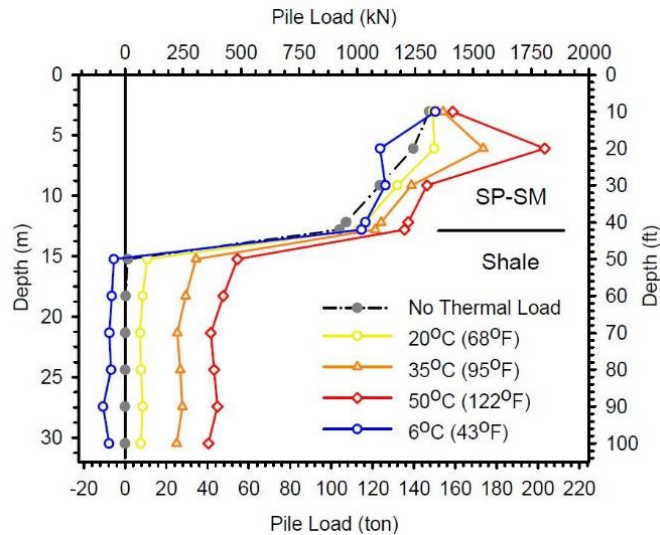


Figura III-20: Evolución del perfil de cargas a lo largo del pilote durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento del ensayo térmico (Olgun et al., 2012)

III.2.4.2 Actividad en la Universidad de Colorado

La Universidad de Colorado está siendo muy activa en los últimos años en el campo de la investigación aplicada de pilotes termo-activos, siendo su máximo representante el Ingeniero civil y profesor John McCartney (McCartney et al., 2010; McCartney and Rosenberg, 2011; McCartney, 2011; Stewart and McCartney, 2012 y 2013; McCartney and Murphy, 2012). Este grupo mantiene en la actualidad diversas líneas de investigación abiertas, como modelos geotérmicos en centrifugadora, modelos numéricos termo-hidro-mecánicos de instalaciones geotérmicas con el código matemático COMSOL y algunos proyectos experimentales.

Uno de los proyectos piloto liderado por la Universidad de Colorado, fue la activación térmica de dos de los 60 pilotes necesarios para la construcción de la residencia de la tercera edad en Denver, Colorado (McCartney and Murphy, 2012). Ambos pilotes, de 0,91 m de diámetro se incorporaron a un sistema convencional de 40 sondas geotérmicas y 143 m de profundidad, con el fin de climatizar el edificio suprayacente (Figura III-21).

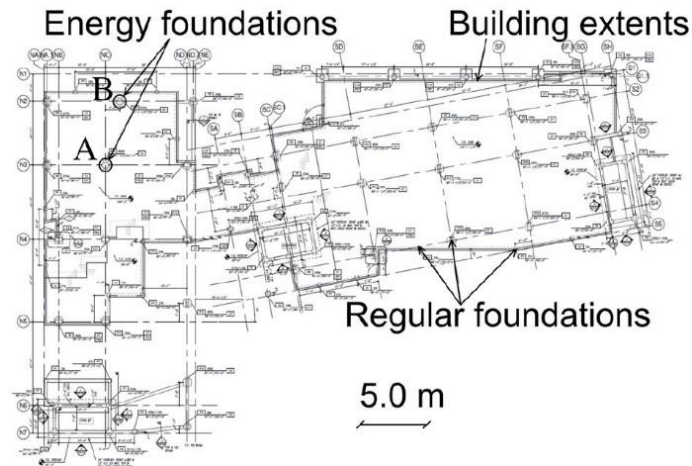


Figura III-21: Planta de la cimentación del edificio y localización de los dos pilotes termoactivos (McCartney and Murphy, 2012)

Los dos pilotes fueron debidamente instrumentados con el fin de medir y registrar la variación del perfil de temperatura y deformaciones axiales con la profundidad en función de la temperatura del fluido caloportador. Para ello, se instalaron 6 extensómetros de cuerda vibrante (VWSG) a diferentes profundidades. Junto a los termistores se acoplaron termistores que midieron la temperatura del hormigón a las mismas profundidades. Adicionalmente se instalaron termopares en las conducciones hidráulicas del sistema térmico, de forma que se registraron las temperaturas de entrada y salida del circuito en los pilotes. La Figura III-22 muestra el perfil litológico de los materiales atravesados, así como la localización de los sensores a diferentes profundidades a lo largo de los dos pilotes.

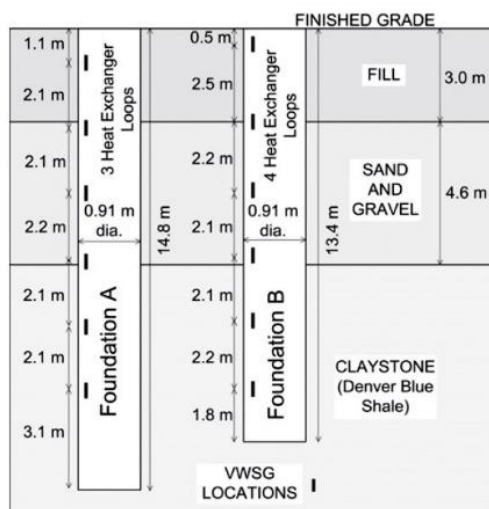


Figura III-22: Perfil litológico y localización de los sensores a lo largo de los pilotes (McCartney and Murphy, 2012)

De los resultados de este proyecto, cabe destacar la variación del perfil de temperaturas de ambos pilotes en función de la temperatura estacional (Figura III-23). Dado que la edificación data de 2010 pero la bomba de calor no estuvo operativa hasta 2012, la cimentación estuvo sometida a las variaciones térmicas estacionales. Los datos registrados evidencian la fuerte influencia que ejerce la temperatura atmosférica en la temperatura de los 4 primeros metros de los dos pilotes. A partir de esta profundidad, la temperatura se estabiliza en torno a un valor constante, de mínima variación estacional, en torno a 14-15°C.

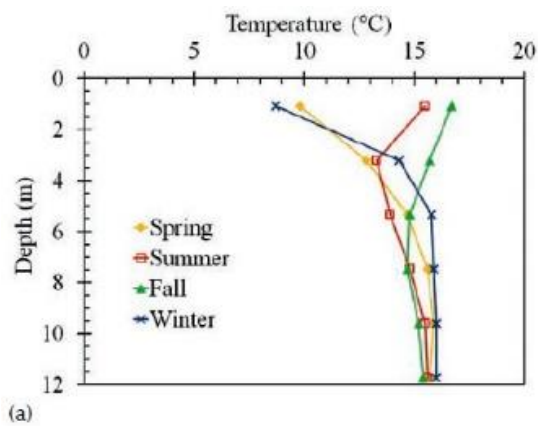
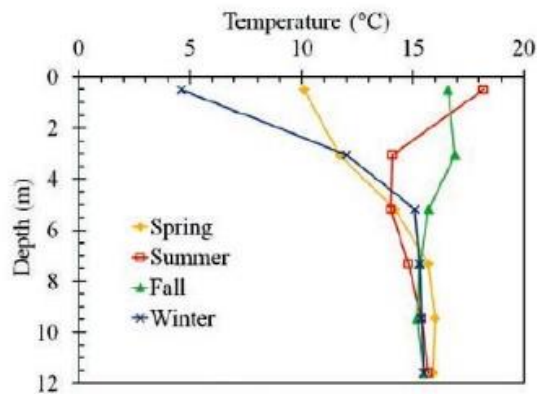


Figura III-23: Variación estacional del perfil térmico de los pilotes (McCartney and Murphy, 2012)



Una vez la edificación fue totalmente finalizada, en octubre de 2011, la carga mecánica sobre los pilotes debida al peso muerto de la estructura se mantiene estable y constante. Se registra a partir de este momento, mediante la adecuada instrumentación, las deformaciones sufridas en los pilotes a diferentes profundidades debido al funcionamiento de la instalación geotérmica, de las que se deducen las tensiones internas de origen térmico (Figura III-24).

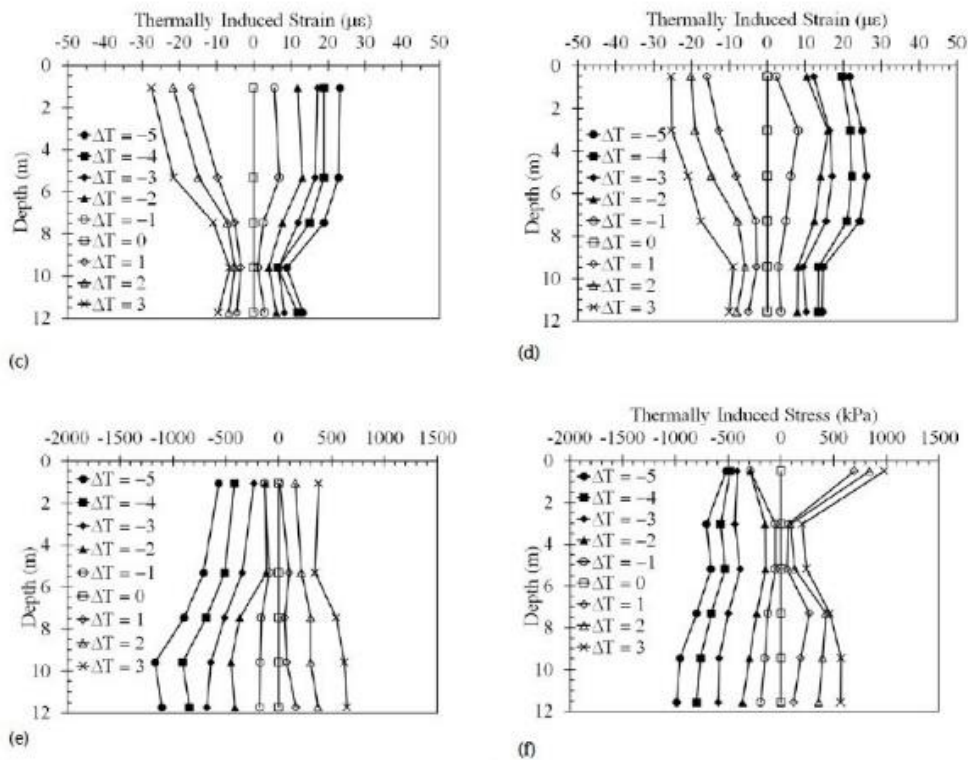


Figura III-24: Perfiles de deformación y de tensiones internas de origen térmico con la profundidad en los dos pilotes durante el funcionamiento de la instalación geotérmica (McCartney and Murphy, 2012)

Finalmente, los autores deducen y comparan las curvas de distribución de deformación con la profundidad debido a la carga mecánica, el calentamiento y el enfriamiento de los pilotes, así como las variaciones de deformación en función de los saltos térmicos (Figura III-25).

A partir de estas gráficas, los autores concluyen que las deformaciones axiales medidas durante el funcionamiento de la instalación, tanto en modo calefacción como refrigeración, se encuentran dentro de límites aceptables sin suponer ningún peligro a sus fines estructurales. Estos resultados permiten concluir a los autores que las cimentaciones termoactivas pueden implementarse como método innovador de eficiencia energética en la climatización sin riesgos estructurales para la edificación.

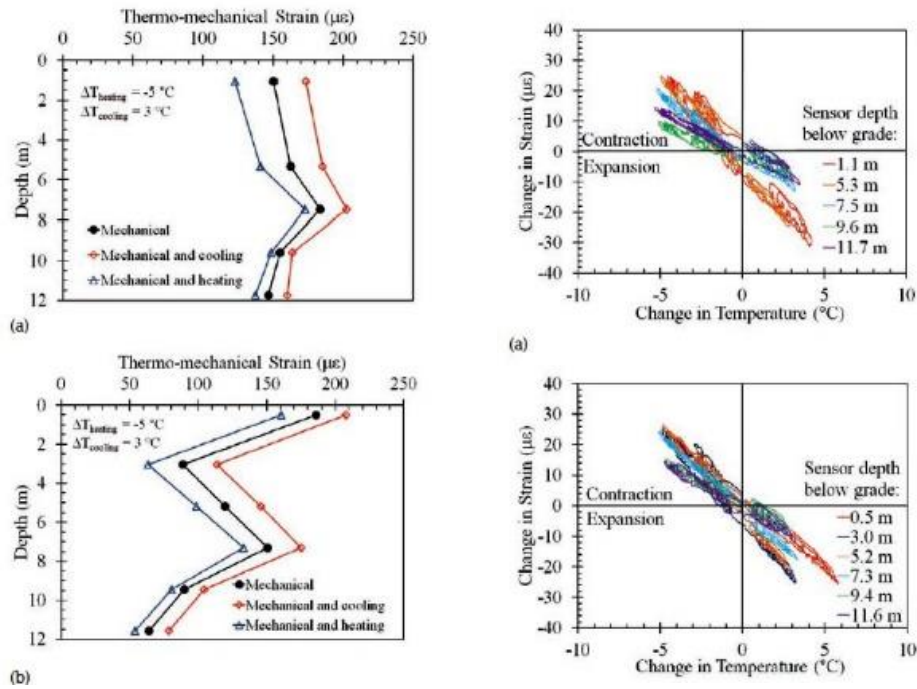


Figura III-25: Izq) Deformaciones axiales debido a la carga mecánica y durante el calentamiento y enfriamiento de los dos pilotes. Dcha.) Relación entre el salto térmico y la deformación sufrida en los pilotes en modo calefacción y refrigeración (McCartney and Murphy, 2012)

III.3 SÍNTESIS DE CONOCIMIENTOS ACTUALES

Aunque la utilización de los pilotes geotérmicos se ha desarrollado bastante en Europa, la práctica de diseño habitual consiste en incrementar el coeficiente de seguridad de forma que las cargas de origen térmico queden cubiertas por éste (Boënnec, 2009). Sin embargo, en los últimos años se está realizando un esfuerzo por aclarar si ese coeficiente de seguridad está justificado o, por el contrario, merece la pena establecer un criterio de diseño menos conservador que ayude a la reducción de costes. En este sentido, muy poca información se encuentra disponible sobre el impacto que los ciclos de enfriamiento - calentamiento tienen sobre el rendimiento geotécnico de los pilotes geotérmicos.

Para describir el estado del conocimiento actual en este campo, se han revisado brevemente las conclusiones más importantes deducidas de los escasos estudios experimentales realizados hasta la fecha y descritos anteriormente. A partir de estos estudios, se ha consensado en unas bases mínimas de comportamiento termo-mecánico de un pilote termoactivo, que se describe a continuación, para concluir este apartado enumerando las incógnitas que aún quedan por resolver y los retos más

importantes a los que se enfrenta la comunidad científico-técnica en el ámbito del comportamiento geotécnico de pilotes termoactivos.

III.3.1 *Deducciones experimentales*

Desde los años 80 del siglo XX, la tecnología de los pilotes geotérmicos ha experimentado una rápida expansión en Europa, aunque en la mayoría de los casos la práctica más común en su diseño como elemento de cimentación ha sido aplicar un coeficiente de seguridad amplificado que cubra las posibles cargas adicionales derivadas de las variaciones térmicas.

Los primeros estudios de pilotes geotérmicos se centraron básicamente en el funcionamiento como intercambiador térmico de estos elementos, admitiéndose en un principio que ni el comportamiento estructural del pilote ni su capacidad portante se verían significativamente afectados por los ciclos de intercambio de calor con el terreno. Sin embargo, en los últimos años se han llevado a cabo algunos estudios que han analizado la relación entre las variaciones térmicas en el pilote y los cambios en la carga por fuste y por punta en el mismo. De ellos parece deducirse que la aplicación de cargas cíclicas de temperatura puede inducir modificaciones significativas en el sistema suelo-estructura, dando lugar a cargas adicionales que deben ser consideradas en el diseño de la cimentación termo-activa.

La evolución de los conocimientos publicados sobre comportamiento termo-mecánico de pilotes posiblemente comienza con el artículo de Brandl (2006), que describe diversos proyectos realizados en Austria. El autor concluye diciendo que la resistencia por fuste, la presión en la base y la capacidad portante del terreno no se ven afectados por la absorción de calor en una cimentación por pilotes geotérmicos. También afirma que el asentamiento o levantamiento producido por las variaciones térmicas son despreciables.

Posteriormente, Laloui, et al. (2006) identifica el problema de la aparición de modificaciones significativas en la interacción suelo-estructura debido al proceso de enfriamiento-calentamiento asociado a la explotación geotérmica. Estas modificaciones llevan a la aparición de esfuerzos adicionales en el pilote, disminución en la fricción lateral y la posibilidad de desarrollo de discontinuidades entre el pilote y el terreno

A continuación, Bourne-Webb, et al. (2009) describen en su trabajo variaciones en la carga axial y la resistencia por fuste del pilote, debidos a cambios en la temperatura del mismo.

Bourne-Webb, et al. (2009) y Ouyang (2011) proponen, a partir de las experiencias adquiridas hasta el momento, un modelo básico de comportamiento de pilotes termoactivos, en el que se razona el origen de las cargas internas adicionales que surgen por enfriamiento o calentamiento del mismo.

Si un pilote en condiciones ideales de movimiento y deformación libre es calentado, reaccionará expandiéndose proporcionalmente a la variación térmica en función de su coeficiente de dilatación o expansión térmica (Figura III-26). De igual manera, si este pilote con libertad absoluta de movimiento y deformación es enfriado, tenderá a contraerse de forma proporcional a la variación térmica según el mismo coeficiente. En ambos casos, la libertad absoluta de deformación hace que no se genere ningún tipo de tensión. Si el pilote este libre tanto en pie como en cabeza y se puede deformar libremente, no estará sometido a ningún tipo de tensión.

DEFORMACIÓN DEL PILOTE POR DIFERENCIAS TÉRMICAS, SIN RESTRICCIÓN DE MOVIMIENTOS

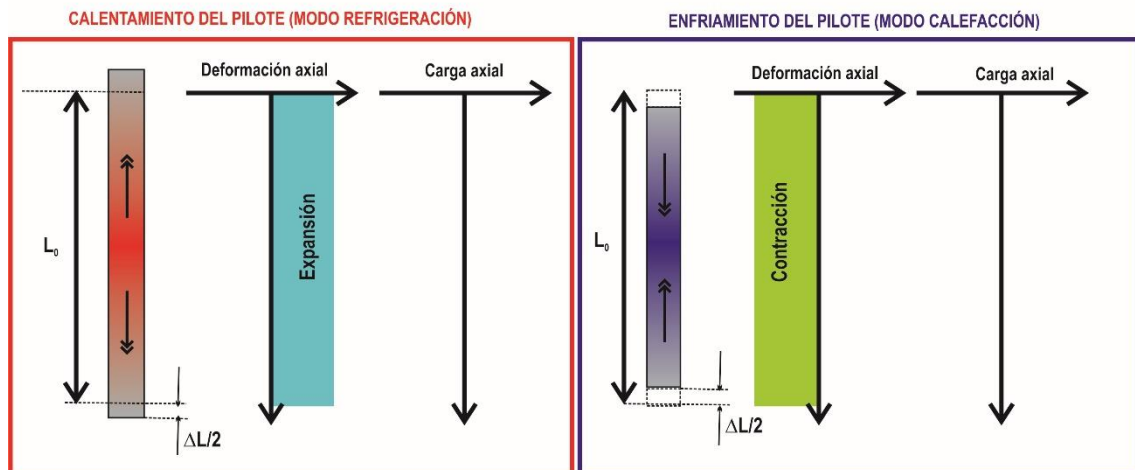


Figura III-26: Deformación y carga axial en un pilote debido a su calentamiento (funcionamiento en modo calefacción) y enfriamiento (funcionamiento en modo refrigeración) sin restricción de movimientos (modificado de Bourne Webb et al., 2009)

Si, por el contrario, se encontrara constreñido en cabeza o en punta por la presencia de una carga mecánica o de un nivel geológico resistente, la restricción de movimiento hace que se generen en el interior del pilote cargas internas extensivas o compresivas según el caso, de origen meramente térmico (Figura III-27).

DEFORMACIÓN DEL PILOTE POR DIFERENCIAS TÉRMICAS, CON MOVIMIENTO TOTALMENTE RESTRINGIDO

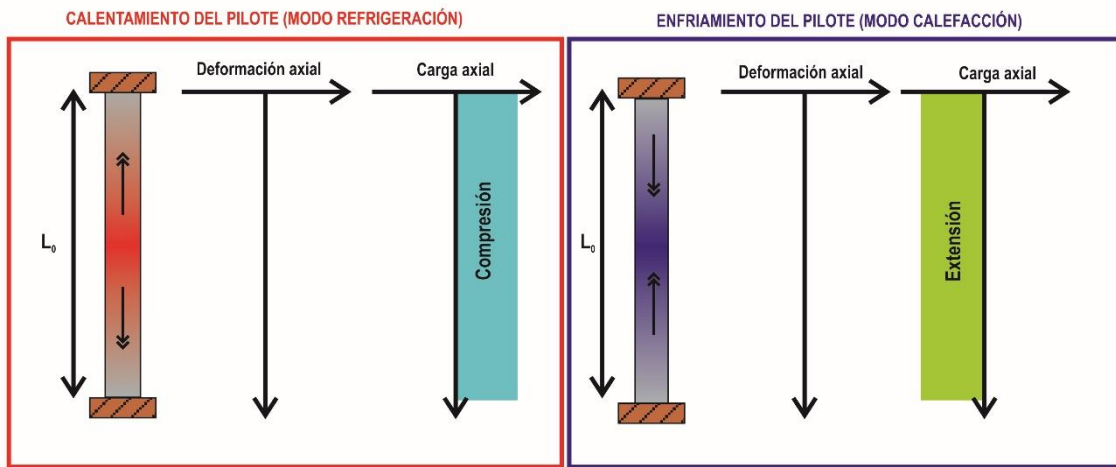


Figura III-27: Deformación y carga axial en un pilote debido a su calentamiento (funcionamiento en modo calefacción) y enfriamiento (funcionamiento en modo refrigeración) con movimiento totalmente restringido (modificado de Bourne Webb et al., 2009)

Éste es un modelo básico en el que a priori sólo se considera la posibilidad de existencia o ausencia de una carga mecánica sobre el pilote al que, adicionalmente, se somete a procesos de enfriamiento y calentamiento. Este modelo se puede complicar incorporando fenómenos de interacción entre el pilote y el terreno en la superficie de contacto, así como variaciones de los parámetros geotécnicos con la temperatura, tanto en pilote como en los materiales geológicos que lo rodean. El estado saturado o no saturado del terreno puede ser otro factor importante en términos de variaciones de la presión intersticial, y por tanto del estado tensional efectivo como consecuencia de la variación de temperatura.

III.3.2 Un modelo de comportamiento termo-mecánico de pilotes

Se describen a continuación, los fundamentos físicos, térmicos y geotécnicos del modelo propuesto por Bourne-Webb, et al. (2009) y Ouyang (2011), creado a partir de las experiencias de Austria, Inglaterra y Suiza, y que serán considerados durante el desarrollo de esta tesis doctoral.

Si una columna equivalente en composición y longitud al pilote estudiado es sometida a una carga térmica sin restricciones físicas a su movimiento o deformación axial, se desarrollará una deformación uniforme de origen térmico (ϵ_T):

Ecuación III-1

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T$$

Donde ε_T es la deformación axial debido a la carga térmica aplicada; α es el coeficiente de dilatación térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) y ΔT es la diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

En tales condiciones, la longitud del pilote variará:

Ecuación III-2

$$\Delta L = \varepsilon_T \cdot L_0$$

donde L_0 es la longitud inicial del pilote (m).

Si, por el contrario, el pilote se encuentra totalmente restringido y no se le permite deformarse axialmente variando su longitud, se desarrollará una carga axial uniforme de origen térmico (N_T), expresado en kN.

Ecuación III-3

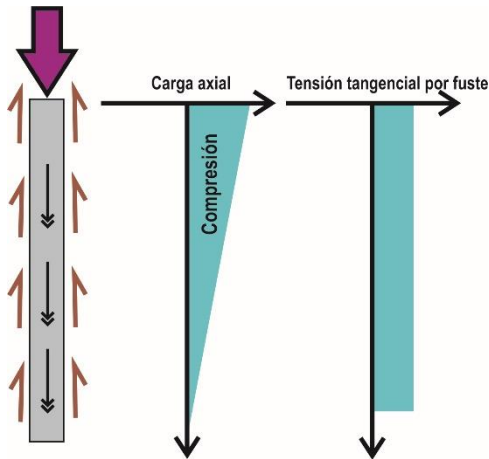
$$N_T = \varepsilon_T \cdot A \cdot E$$

Donde ε_T es la deformación axial debido a la carga térmica aplicada; A es el área de la sección del pilote (m^2) y E es el módulo de Young del material que compone la columna, expresado en Pa.

A continuación, se ofrecen una serie de casos teóricos de un pilote trabajando por fuste sometido a todas las posibles combinaciones de carga mecánica y carga térmica. Se asume en todos los casos (extraídos de Bourne-Webb et al., 2009), que la resistencia generada es uniforme a lo largo de todo el fuste, es decir, el terreno es homogéneo. También se asume que los cambios térmicos son uniformes en toda la longitud del pilote, y por lo tanto el pilote expande o contrae en torno a un punto “neutro” situado teóricamente en el medio del pilote. El punto neutro se encuentra a una profundidad tal que la suma de la fricción movilizada sobre la parte superior más la reacción de la estructura es igual a la suma de la fricción movilizada a lo largo de la parte inferior de la estructura más la reacción en la base de la estructura.

III.3.2.1 Carga mecánica sin variaciones térmicas

Un pilote sometido a una carga mecánica estable, como puede ser el peso muerto de un edificio o estructura suprayacente, se encuentra físicamente en condiciones de compresión (Figura III-28).



En estas condiciones, el pilote tiende a introducirse en el terreno mientras la resistencia por fricción superficial con el terreno circundante se opone a este movimiento. En éste, que es el caso más sencillo, la resistencia lateral movilizada por rozamiento es constante y, en consecuencia, la carga (N) y la deformación (ϵ_T) disminuyen linealmente con la profundidad.

Figura III-28: Pilote sometido a una carga mecánica sin variaciones térmicas (modificado de Bourne-Webb et al., 2009)

III.3.2.2 Enfriamiento del pilote sin carga mecánica

Si se aplica un enfriamiento al pilote sin restricción de movimiento vertical, éste tenderá a contraerse y cualquier restricción que ofrezca el rozamiento del fuste con el terreno circundante dará lugar a la creación de tensiones internas de tracción en el interior del pilote (Figura III-29).

En la parte superior del pilote, la tensión por cizalla en la superficie de contacto con el terreno se moviliza en el mismo sentido que en el caso de la aplicación de compresión por una carga mecánica, mientras que en la parte inferior la tensión por cizalla se movilizará en el sentido contrario.

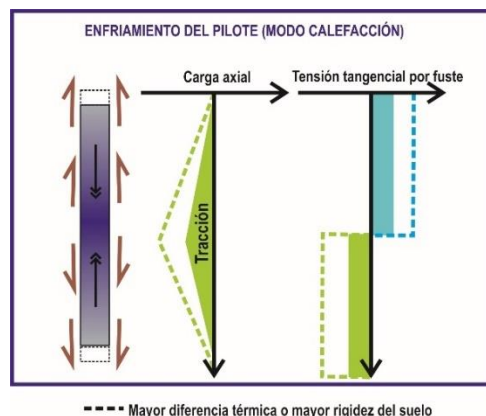
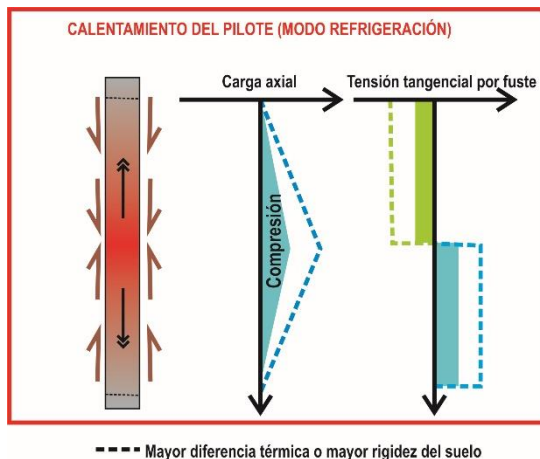


Figura III-29: Enfriamiento del pilote en modo calefacción, sin aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009)

III.3.2.3 Calentamiento del pilote sin carga mecánica.

De forma análoga al caso anterior, si un pilote con libertad de movimiento vertical es calentado, tenderá a expandir y cualquier restricción que ofrezca el rozamiento del fuste dará lugar a unas tensiones internas de compresión dentro del pilote (

Figura III-30).



En la superficie de contacto entre pilote y terreno ocurre exactamente lo contrario al caso del enfriamiento, es decir, el esfuerzo cortante movilizado en la parte superior del pilote será el opuesto al generado por la compresión de una carga mecánica aplicada. La parte inferior se movilará en el sentido contrario que la parte superior.

Figura III-30: Calentamiento del pilote en modo refrigeración, sin aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009)

III.3.2.4 Aplicación combinada de carga mecánica y térmica

La aplicación combinada y simultánea de carga mecánica y variaciones térmicas supone un grado más de complejidad en el modelo (Figura III-31).

Si el pilote, bajo la acción de una carga mecánica externa y estable, es enfriado, las cargas axiales se hacen menos compresivas e incluso pueden llegar a transformarse en distensivas. Ello puede deberse a que la carga mecánica disminuye con la profundidad y las cargas totales, resultado de la suma de cargas mecánicas más térmicas, pueden llegar a ser negativas o de tracción cerca del pie del pilote si la carga de enfriamiento es alta.

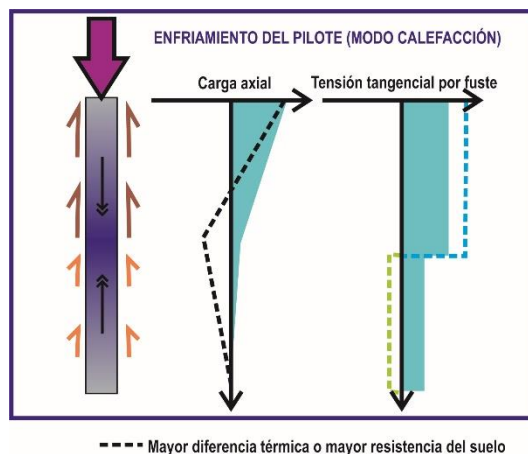
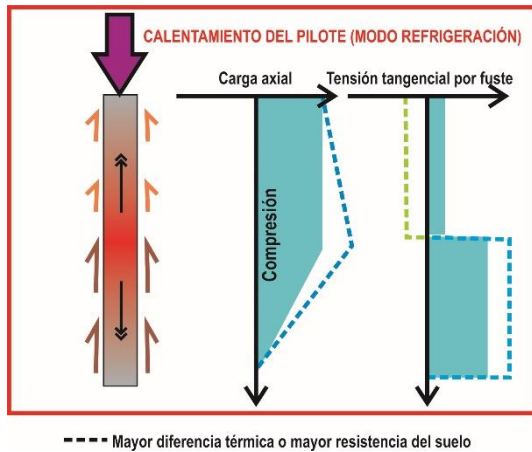


Figura III-31: Enfriamiento del pilote en modo calefacción con aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009)

Paralelamente, la tensión tangencial por fuste aumenta en la parte superior del pilote y disminuye en la parte inferior (Figura III-32).



En caso de tratarse de un calentamiento bajo la compresión de una carga mecánica, la carga axial total resultante se hace más compresiva, y la resistencia por fricción superficial movilizada disminuye en la parte superior del pilote y aumenta en la parte inferior.

Figura III-32: Calentamiento del pilote en modo refrigeración con aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009)

III.4 NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

En un entorno como el actual en el que resulta crucial aumentar la utilización de energías renovables y desarrollar un crecimiento demográfico y urbanístico más sostenible, la utilización de elementos estructurales de edificios u obras civiles como partes de un sistema de explotación geotérmica somera abre un amplio abanico de posibilidades en el ámbito de la eficiencia energética.

En algunos países europeos como Alemania, Inglaterra, Suiza o Austria ya se ejecutan obras con elementos termoactivos que permiten aprovechar la energía almacenada en el subsuelo. Sin embargo, la práctica de este tipo de estructuras no ha ido acompañada de una investigación que justifique un correcto dimensionamiento, diseño, ejecución y explotación, sino que se ha optado por asumir que el funcionamiento térmico no afecta al comportamiento estructural o se ha sobredimensionado el coeficiente de seguridad para garantizar un correcto funcionamiento a largo plazo, a costa de un incremento del coste de ejecución.

Siendo conscientes de la necesidad de investigación en este campo, son todavía escasos los estudios realizados hasta el momento. Gracias a éstos, se ha recopilado

una serie de conocimientos sobre el comportamiento termo-geotécnico de elementos de cimentación termoactivos que han hecho posible crear un modelo básico susceptible de aumentar, hacer más amplio y complejo a medida que se vayan incrementando las experiencias y los datos en ensayos experimentales como el que se ofrece en esta tesis.

Centrándose en los pilotes, resulta necesaria una mayor investigación que permita tener en cuenta debidamente los efectos térmicos en el diseño estructural de los elementos de cimentación, y se incluyan en las correspondientes normativas y códigos de construcción:

En primer lugar, es importante evaluar los efectos a corto, medio y largo plazo de las cargas termo-mecánicas en las cimentaciones termo-activas, la evolución de los **estados tenso-deformacionales** con la profundidad, las propiedades geotécnicas del terreno circundante y la variación de temperatura, como ya han sido medidos y descritos por Laloui, et al. (2006) y Bourne-Webb, et al. (2009). Por ejemplo, los ensayos realizados hasta el momento indican que en cimentaciones de pequeño tamaño y en condiciones operacionales de temperatura normales, las tensiones cíclicas generadas en el fuste se encuentran dentro del límite elástico. Sin embargo, los ciclos de enfriamiento y calentamiento pueden dar lugar a una disminución acumulada de la resistencia por fuste si el suelo no se recupera con la cimentación durante el enfriamiento, esta afirmación no ha sido ampliamente estudiada hasta el momento.

Aunque las evidencias disponibles hasta el momento parecen apuntar a que la **capacidad portante** de los pilotes no se ve afectada de forma adversa por los ciclos térmicos a los que se ve sometido, resulta de vital importancia evitar que el pilote se congele. Ello añade condicionantes en el diseño de este tipo de estructuras.

En cuanto a **los esfuerzos y deformaciones en el hormigón**, los ensayos realizados hasta el momento evidencian que las tensiones axiales originadas por las alternancias de expansión contracción debidas al calentamiento y enfriamiento del pilote se mantienen dentro de los límites aceptables para el hormigón (Laloui et al., 2006). De hecho, los mismos ensayos ofrecen un coeficiente de expansión térmica sin restricciones de $8,5 \cdot 10^{-6}$ m/m/°C. Usando este dato, un aumento de 10°C en un pilote de 13 m de longitud sufriría una expansión térmica sin restricciones de 1 mm. Los movimientos del pilote debidos a cambios de temperatura deberían ser tenidos en

cuenta junto con los movimientos debidos a las cargas mecánicas, para evaluar los límites aceptables de diseño.

El **terreno que rodea al pilote** se puede ver también afectado por las variaciones térmicas producto de la explotación geotérmica. Los ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento pueden causar contracción y expansión del volumen del suelo y dar lugar a cambios en las tensiones horizontales totales del terreno. Además, en función de la permeabilidad del material geológico y su capacidad de disipar las presiones intersticiales generadas por el aumento de temperatura, se pueden producir flujos hidráulicos en función de gradientes térmicos o aumentos de presiones intersticiales y, por tanto, disminución de tensiones efectivas. Este efecto puede dar lugar a reducciones en la fricción superficial del pilote, o la reducción del volumen del suelo, que a su vez puede producir efectos de fricción negativa en suelos normalmente consolidados.

Otro de los objetivos en pilotes energéticos es conocer qué ocurre con **diámetros mayores**, del orden de 1200 mm, ¿Un diámetro mayor tendrá mayor deformación radial? ¿Cuál es el efecto en la transferencia de calor y la resistencia por fuste? Estas son preguntas que actualmente no tienen respuesta.

Es necesario diseñar un **ensayo de respuesta térmica** adecuado a las condiciones geométricas de las cimentaciones termoactivas. El actual ensayo TRT (Thermal Response Test), se basa matemáticamente en la teoría de la fuente de calor lineal infinita, condición que no se cumple en pilotes (menos aun cuando son de gran diámetro), en pantallas, losas, túneles, etc.

Finalmente, Ouyang (2011) enumera los puntos importantes que deben ser garantizados en el diseño de un pilote geotérmico:

- Las tensiones en el hormigón deben ser menores que el límite permitido. Como caso extremo se puede estudiar el pilote totalmente restringido de posibles movimientos.
- La fricción por fuste movilizada debe ser menor que la resistencia límite de proyecto. Para estudiar este punto se puede asumir que el pilote puede expandir totalmente en ambos extremos, pero en algún punto del medio no existen movimientos (punto neutro).
- La presión en punta debe ser menor que la capacidad límite de proyecto. Para ello se puede estudiar el caso extremo asumiendo que el pilote está totalmente

restringido de posibles movimientos. Sin embargo, permitir movimientos en los extremos reduce la carga debida a variaciones térmicas.

- El movimiento del pilote debe ser menor que lo que la superestructura puede tolerar. Para ello es necesario realizar un análisis de interacción suelo-pilote.

CAPITULO IV

PLANIFICACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

IV.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe todas las fases del proyecto llevadas a cabo con el fin de obtener los datos con los que elaborar el estudio que se propone.

En primer lugar, se define el emplazamiento seleccionado, describiendo su geología en el contexto del marco geológico de la ciudad de Valencia. Posteriormente se ofrece una descripción geotécnica basada en la realización de un sondeo mecánico con extracción de testigo y ensayos SPT a diferentes profundidades que han permitido obtener muestras para ser posteriormente estudiadas en laboratorio. El estudio de laboratorio ha permitido identificar, clasificar y describir los diferentes niveles geológicos del terreno. Esta información resulta de gran valor en la interpretación y análisis de los datos registrados por los sensores, dando un contexto geológico a la respuesta del terreno a lo largo del estudio. El estudio geotécnico se termina con un ensayo DPSH y una recopilación de datos de informes geotécnicos elaborados en las inmediaciones del emplazamiento seleccionado.

Una vez conocido el terreno, y previamente a la ejecución del estudio experimental, fue necesario un minucioso diseño del ensayo, en sus tres vertientes: diseño del pilote, diseño de las sollicitaciones mecánicas y diseño de las sollicitaciones térmicas aplicadas al mismo para evaluar su comportamiento. El diseño de las sollicitaciones, tanto térmicas como mecánicas, se describe en dos pasos: la descripción del sistema de aplicación de tales sollicitaciones, que tuvo que ser definido a la medida del estudio propuesto, y la secuencia temporal de sollicitaciones.

Ya definido con todo detalle el pilote y los aspectos técnicos del ensayo, se procedió a la construcción del pilote, su traslado y su hincada en el emplazamiento seleccionado. Tras la hincada, se realizó una prueba de carga dinámica para evaluar la resistencia del pilote ya in situ.

Posteriormente se procedió a la activación térmica del pilote mediante la introducción de la sonda del intercambiador geotérmico diseñado en fases previas y las pruebas necesarias para garantizar el correcto funcionamiento y la estanqueidad del sistema instalado.

A continuación, se montaron los sistemas de aplicación de las cargas térmicas y mecánicas y se terminó de instalar la instrumentación externa necesaria para medir y registrar los parámetros necesarios para la realización del estudio.

Se describen con detalle a continuación cada una de estas fases.

IV.2 SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

IV.2.1 Selección del emplazamiento

El pilote prefabricado termo-activo objeto de estudio en este proyecto, fue hincado en el campus de la Universidad Politécnica de Valencia, en el Camino de la Iglesia de Vera 34-38, 46022 Valencia. En la Figura IV-1 se muestra mediante fotos aéreas la localización exacta de emplazamiento del pilote.

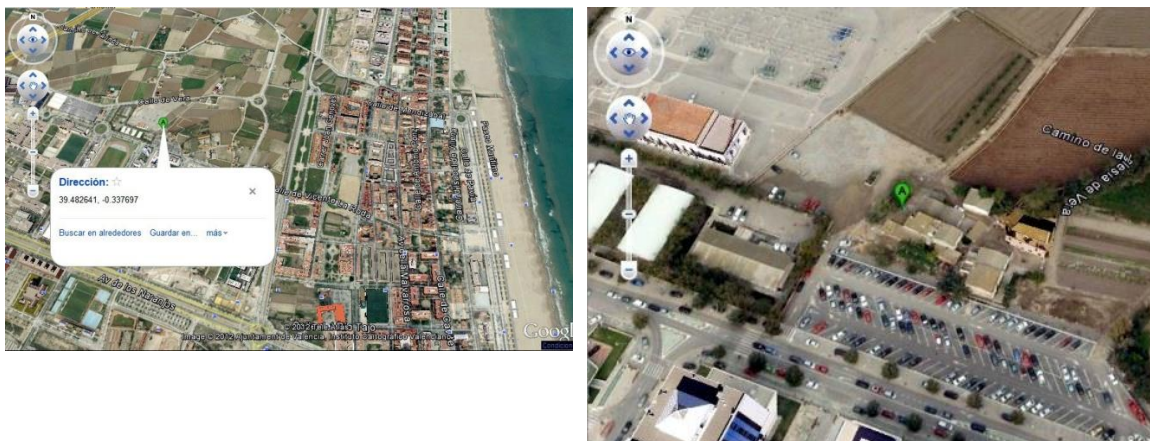


Figura IV-1: Emplazamiento del pilote en el campus de la UPV (<https://maps.google.com/>).

IV.2.2 Marco geológico del emplazamiento seleccionado

El estudio se ha iniciado con la recopilación y análisis de la información geológica disponible de la zona. Como información previa, se ha consultado la hoja 722 (Valencia) del Mapa Geológico de España, editada a escala 1:50.000 por el Instituto Geológico y Minero de España. En él, se observa que la totalidad de la ciudad de Valencia se encuentra en una amplia zona de dominio cuaternario identificada con las siglas Q_1^{3li} . En la leyenda del mapa (Figura IV-2) se observa que estas siglas corresponden a limos de inundación, depositados en ambiente continental durante el Pleistoceno Superior de la Era Cuaternaria.



**Figura IV-2: Mapa Geológico
1:50.000 de la serie MAGNA
(IGME, 1974)**

Los limos de inundación $Q_1^3 li$ forman un amplio cono que corresponde a la parte superficial del delta del Turia. Estos sedimentos, que bajan en suave pendiente hacia la costa, están constituidos por limos arenosos grises y parduzcos, depositados en episodios de desbordamiento del río Turia, sobre los que el propio río ha excavado posteriormente un nivel de terrazas.

Según el mapa geotécnico general de Valencia, Hoja 8-7/56 1:200.000 (IGME, 1973), la zona seleccionada para hincar el pilote pertenece al área **I1**, descrita como playas mediterráneas, las extensas marismas adosadas al litoral, que permanecen parcialmente inundadas durante todo el año, y gran parte de las tierras de cultivo de la huerta valenciana.

La litología del área está constituida por: a) arenas síliceas lavadas en las playas; b) arcillas, margas, gravas y arenas en casi toda la tierra llana, con distribución muy irregular, debido a su origen deltaico; c) arenas finas, limos y légamos saturados de agua salobre en la zona ocupada por las marismas y cantizal con arenas y arcillas en la zona próxima a las sierras, por disgregación de las rocas, y pequeño transporte a zonas más estables.

El espesor de estos depósitos es superior a los 100 m. y su base se encuentra debajo del nivel del mar.

La topografía es sensiblemente horizontal, y las pendientes no son superiores al 5% en ninguno de los casos.

El área es totalmente estable, tanto naturalmente como bajo la acción del hombre. Solamente cerca de las sierras y de las cunas fluviales suceden pequeños abarrancamientos sin importancia.

La permeabilidad de los materiales es muy variable, como corresponde a su heterogénea naturaleza, abundando los encharcamientos permanentes.

En resumen, la ciudad de Valencia, en el mapa zonificado en función de sus condiciones constructivas, se encuentra en un área de condiciones constructivas aceptables, con problemas de tipo hidrológico y geotécnico. La región comprendida en este apartado, constituye una gran llanura próxima a la costa, sobre la que se asientan los mayores núcleos urbanos de la región, incluida la ciudad de Valencia. La capacidad de carga de los terrenos es media, los asientos elevados y el drenaje desfavorable, pudiendo cambiar puntualmente las condiciones mencionadas que, no obstante, son las más generales. El resto de sus características son totalmente favorables.

IV.2.3 *Sondeo mecánico*

En el local de ensayo seleccionado, en enero de 2012, fue ejecutado un sondeo a una distancia de dos metros del emplazamiento donde posteriormente fue hincado el pilote

La perforación se realizó mediante el sistema de rotación con extracción de testigo, usando para ello una batería simple con corona de widia. En los dos primeros metros el diámetro de avance fue de 113 mm, el resto del sondeo se perforó con batería de 101 mm. Debido a la naturaleza inconsistente del terreno, fue necesario el sostenimiento de las paredes del sondeo mediante tubería de revestimiento de 113 mm con cabezal de widia hasta 24,5 m de profundidad.

Se realizaron además **9 ensayos de penetración estándar (SPT)**, a diferentes profundidades con un tomamuestras de 60 cm de longitud según norma (UNE-EN ISO 22476-3: 2006). Los ensayos de penetración estándar SPT (Standard Penetration Test) se incluyen dentro del grupo de ensayos de penetración dinámica, que consisten en contabilizar el número de golpes N necesarios para hincar tramos de varillaje de 10 o 20 cm de longitud. Los golpes son dados por una maza de peso conocido que cae libremente desde una altura constante. En el caso concreto del SPT, el ensayo se realiza en el interior de los sondeos, permitiendo de esta forma la toma simultánea de muestras mediante la hincada de un portamuestras específico. En este ensayo el valor de N el número de golpes necesario para hincar dicho portamuestras 15+15 cm mediante la caída de una maza de 63,5 Kg desde una altura de caída de 0,76 m.

En la Figura IV-3 se puede observar la sección vertical del terreno reconstruida a partir de la descripción del testigo extraído del sondeo, con la localización de los ensayos de caracterización realizados.

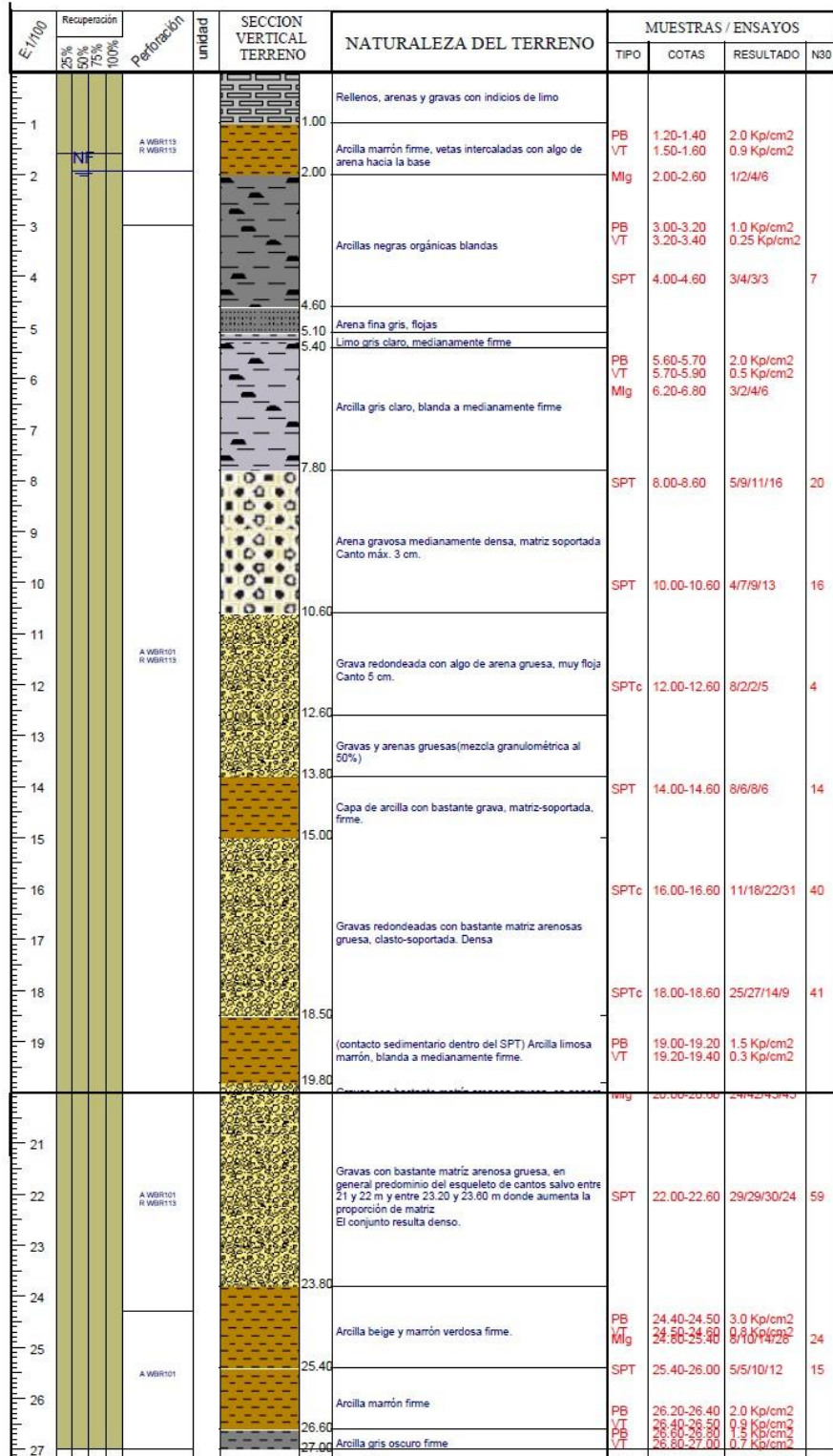


Figura IV-3: Sección vertical del terreno reconstruida a partir de la descripción del testigo extraído del sondeo, con la localización de los ensayos de caracterización realizados.

IV.2.4 Prueba de penetración dinámica superpesada

La prueba de penetración dinámica superpesada o DPSH (del inglés Dynamic Probing Super Heavy), es un tipo de prueba de penetración dinámica con registro continuo, que se emplea en la caracterización de un terreno, dentro de un reconocimiento geotécnico.

Es un ensayo normalizado en España (Norma UNE 103801: 1994), que consiste en la penetración de una puntaza similar a la del penetrómetro pesado que penetra en el terreno. La energía de golpeo la proporciona una maza de 63,50 kg de peso en caída libre desde 76 cm de altura a un ritmo de 30 golpes por minuto. Durante el ensayo se contabiliza el número de golpes necesarios para la penetración en el terreno de una puntaza cónica de hierro macizo de 50 mm de diámetro y 20 cm² de área nominal, registrados en tramos de 20 cm (N_{20}).


Se da por finalizado el ensayo cuando, dadas tres series de 75 golpes cada una, la penetración sea igual o inferior a 20 cm en cada una de ellas aisladamente, cuando dados 100 golpes la penetración no supera los 20 cm, o bien cuando se llegue al límite estimado suficiente de reconocimiento de subsuelo.

Según la norma UNE 103801:1994 la prueba de penetración dinámica DPSH está especialmente indicada para suelos granulares. Su utilización permite:

- Determinar la resistencia a la penetración dinámica de un terreno
- Evaluar la compacidad de un suelo granular
- Investigar la homogeneidad o anomalías de una capa de suelo
- Comprobar la situación en profundidad de una capa cuya existencia se conoce

A partir de este valor de la resistencia a la penetración dinámica, se puede deducir la tensión admisible del terreno mediante correlaciones semiempíricas, en función de la naturaleza y características de los materiales del subsuelo, incluso dicho valor puede correlacionarse igualmente con otros parámetros geotécnicos, como el índice N_{30} , obtenido de la prueba de penetración estándar (SPT) o la resistencia a compresión simple (q_u).

El ensayo de penetración superpesada DPSH se llevó a cabo el 16 de enero de 2012 justo en el mismo punto donde posteriormente fue hincado el pilote experimental. La curva DPSH resultante del ensayo se puede observar en la Figura IV-4.

	SONDEOS, ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA, S.A.		LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION: Telf. 96 159 07 40 - Fax.96 159 13 97	
	C/Artes Gráficas,42 Pol.Industrial La Mina. 46200-PAIORTA (VALENCIA) e-mail: Laboratorio@seg-sa.es		Laboratorio de Ensayos ACREDITADO por la Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda en las áreas de: EHA, N° 07035EHA/08 (B), VSG, N° 07035VSG/08(B), GTC, N° 07035GTC/08(B), GTL, N° 07035GTL/08(B), EAS, N° 07035EAS/08(B), EAP, N° 07035EAP/08 (B), por Resolución de 17/10/08, publicada en el DOGV 26/11/08, e inscrita en el RGLEA, publicada en el BOE 16/08/04	
Miembro de la Asociación Española de Ensayos no Destructivos (A.E.N.D.) N° 0112.		EMPRESA CERTIFICADA EN ISO-9001 E ISO-14001 POR AENOR.		

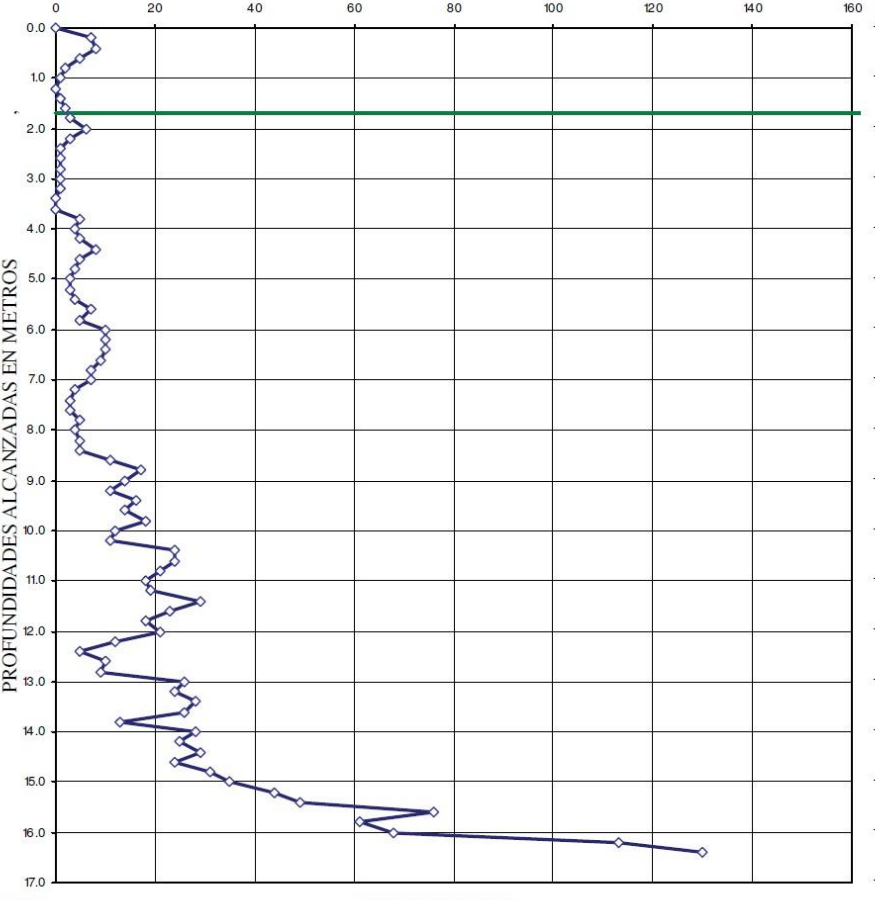
MODALIDAD CONTROL	ET ESTUDIO PARA PILOTE EN LA UPV	CLAVE	094/6602	F. TOMA	16/01/12
PETICIONARIO	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA	C.I.F.	Q-4618002-B	F. REGISTRO	16/01/12
DOMICILIO	CAMINO DE VERA S/N (VALENCIA)	CONSTRUCTOR	N/A		
TIPO MATERIAL	SUELOS	PROCEDENCIA	PD-1		
MODALIDAD MUESTREO	AM BAUTISTA MORALES	O.T.N.	12002	COD.IDENTIF. MUESTRA	269,611

Fecha Fin Ensayo	ACTA DE RESULTADO DE ENSAYOS N°: 438537		Hoja 1 de 1
13/01/12	PRUEBA CONTINUA DE PENETRACION SUPERPESADA DPSH (Norma UNE 103-801-94)		
HORA	DURACION	Tipo de Cono: PERDIDO	Diámetro: 50.5 mm.
8:15:00	3:00:00	Longitud Cilíndrica: 50 mm.	Longitud Cónica: 25 mm.
NIVEL FREATICO: Mts		Masa: 662 gr.	Excentricidad Varillaje: 0
CERRADO: 1.7 Mts		Long. Varillaje: 1m.	Masa Varillaje: 8 Kg/m.
		Masa Total Dispositivo de Golpeo: <115 Kg.	Diámetro Varillaje: 33 mm.
		Condiciones Ambientales:	Deflexión del Varillaje: 0
PD - 01			

TIPO PENETROMETRO:	N(20) = NUMERO DE GOLPES POR 20 CMS		PAR (N.m)
DPSH	0 20 40 60 80 100 120 140 160		0

PROFUNDIDADES ALCANZADAS EN METROS

0.0	0	12
0.1	7	11
0.2	8	24
0.3	5	24
0.4	2	21
0.5	1	18
0.6	0	19
0.7	1	29
0.8	2	23
0.9	3	18
1.0	6	21
1.1	3	12
1.2	1	5
1.3	1	10
1.4	1	9
1.5	1	26
1.6	1	24
1.7	0	28
1.8	0	26
1.9	5	13
2.0	4	28
2.1	8	29
2.2	5	24
2.3	4	31
2.4	3	35
2.5	3	44
2.6	4	49
2.7	7	76
2.8	5	61
2.9	10	68
3.0	10	113
3.1	10	130
3.2	9	
3.3	7	
3.4	7	
3.5	4	
3.6	3	
3.7	3	
3.8	3	
3.9	5	
4.0	4	
4.1	5	
4.2	5	
4.3	11	
4.4	17	
4.5	14	
4.6	11	
4.7	16	
4.8	14	
4.9	18	
5.0	12	



DATOS COMPLEMENTARIOS:	OBSERVACIONES:

1 COPIA: Propiedad Dirección Obra Constructora O.C.T. Otros

F-GTC-05B.2

Paiporta, 16 de enero de 2012

Firma válida

Digitalmente firmada por
ROSA MARIA FAUS GARCIA
Fecha de firma: 16/1/2012 12:9

RESPONSABLE AREA GTC
ROSA Mª FAUS GARCIA
ING. TEC. OBRAS PUBLICAS

Figura IV-4: Curva obtenida durante el ensayo DPSH

IV.2.5 Ensayos de laboratorio

La recuperación del testigo extraído del sondeo permite la reconstrucción de la sección vertical del terreno perforado. Además, los materiales extraídos, una vez transportados al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, fueron analizados con el fin de identificar, clasificar y describir los distintos niveles geológicos atravesados por la perforación. La Figura IV-5 muestra la localización exacta de las muestras.

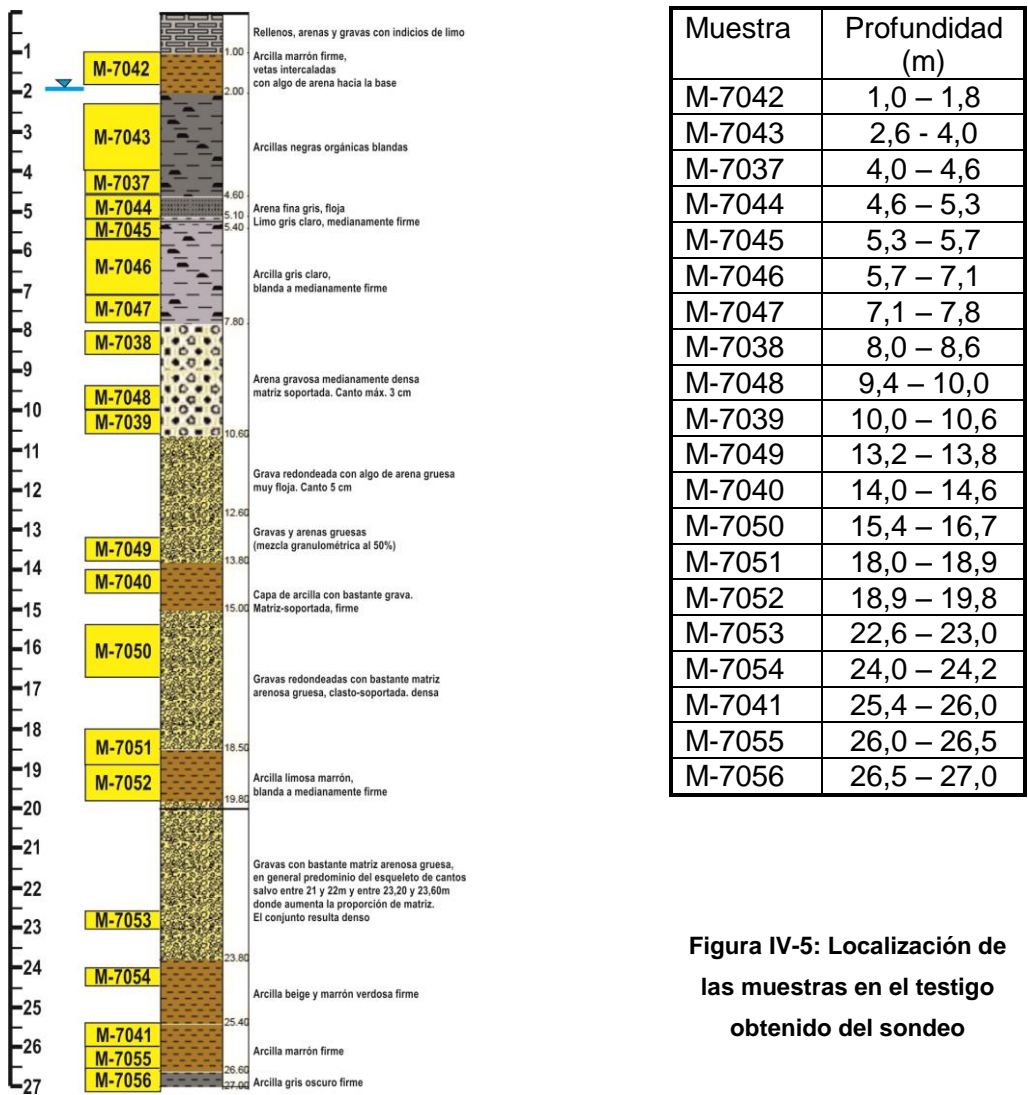


Figura IV-5: Localización de las muestras en el testigo obtenido del sondeo

Se han llevado a cabo en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, una serie de ensayos encaminados a la identificación, clasificación y descripción de las muestras

obtenidas del testigo del sondeo realizado. En la Tabla IV-1 se enumeran los ensayos y la norma o método seguido en cada caso.

Tabla IV-1: Ensayos de laboratorio realizados en el CEDEX

Ensayos de laboratorio realizados			Norma/método
Identificación geotécnica	Descripción de las muestras		ISO 14688-1:2002
	Peso específico Helio		ASTM D 5550-06
	Granulometría	Tamizado	UNE 103-101:1995
		sedimentación	UNE 103-102:1995
	Límites de Atterberg	Límite Líquido	UNE 103-103: 1994
Límite plástico		UNE 103-104: 1993	
Composición mineralógica			Difracción de rayos-X
Química	Composición química		Sin normativa específica
	Características Q.	Fluorescencia de rayos-X	
		Carbonatos	UNE 103-200:1993
		Sulfatos	UNE 103-201:1996
		Materia Orgánica	Sustitución de la norma UNE 103-204:1993
L.O.I.			

Paralelamente se ha tomado otra serie de muestras del testigo del sondeo con la finalidad de medir la conductividad térmica mediante dos métodos de laboratorio:

- Método de la aguja simple: según indicaciones de la Norma ASTM D 5334-08: “Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure”
- Método de la aguja doble: descrito por Bristow et al. (1994)

IV.2.5.1 Composición granulométrica y plasticidad

Se han realizado análisis granulométricos mediante los métodos de tamizado y sedimentación, en función de las características de cada muestra. Asimismo, en los casos en que ha resultado posible, se han determinado los límites de Atterberg: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Se resumen en la

Tabla IV-2 los resultados obtenidos, ordenados en función de la posición de la muestra en el testigo y su profundidad.

Tabla IV-2: Datos de granulometría, plasticidad y peso específico obtenidos en laboratorio

Muestra	Ubicación		Granulometría (%)				Plasticidad			Peso específico
	Prof.	Prof.	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas	LL	LP	IP	γ_s

Capítulo IV. Planificación, diseño y construcción del prototipo

	inicial	Final								
M-7042	1	1,8	0	35	34	30	29,92	20,07	9,85	2,67
M-7043	2,6	4	0	6	66	28	36,88	21,54	15,34	2,66
M-7037	4	4,6	0	81	12	7	NO PLÁSTICO			2,68
M-7044	4,6	5,3	0	75	15	10	NO PLÁSTICO			2,67
M-7045	5,3	5,7	0	8	71	21	28,89	22,39	6,49	2,67
M-7046	5,7	7,1	0	53	38	8	NO PLÁSTICO			2,67
M-7047	7,1	7,8	0	6	66	27	31,48	20,35	11,13	2,67
M-7038	8	8,6	40	42	12	7	NO PLÁSTICO			2,68
M-7048	9,4	10	51	36	7	6	NO PLÁSTICO			2,67
M-7039	10	10,6	69	30	0	0	NO PLÁSTICO			2,69
M-7049	13,2	13,8	58	26	9	7	NO PLÁSTICO			2,70
M-7040	14	14,6	62	20	10	8	NO PLÁSTICO			2,67
M-7050	15,4	16,7	71	24	3	3	NO PLÁSTICO			2,69
M-7051	18	18,9	0	26	50	23	NO PLÁSTICO			2,68
M-7052	18,9	19,8	0	9	62	29	31,94	20,41	11,53	2,69
M-7053	22,6	23	58	31	6	4	NO PLÁSTICO			2,68
M-7054	24	24,2	0	7	59	34	31,58	18,03	13,55	2,68
M-7041	25,4	26	0	9	46	45	33,48	18,12	15,35	2,67
M-7055	26	26,5	0	1	23	77	56,87	26,15	30,72	2,69
M-7056	26,5	27	0	2	39	59	46,33	24,06	22,27	2,66

En la Figura IV-6 se representa la variación de la composición granulométrica en términos de porcentaje relativo de gravas, arenas, limos y arcillas, en función de la profundidad.

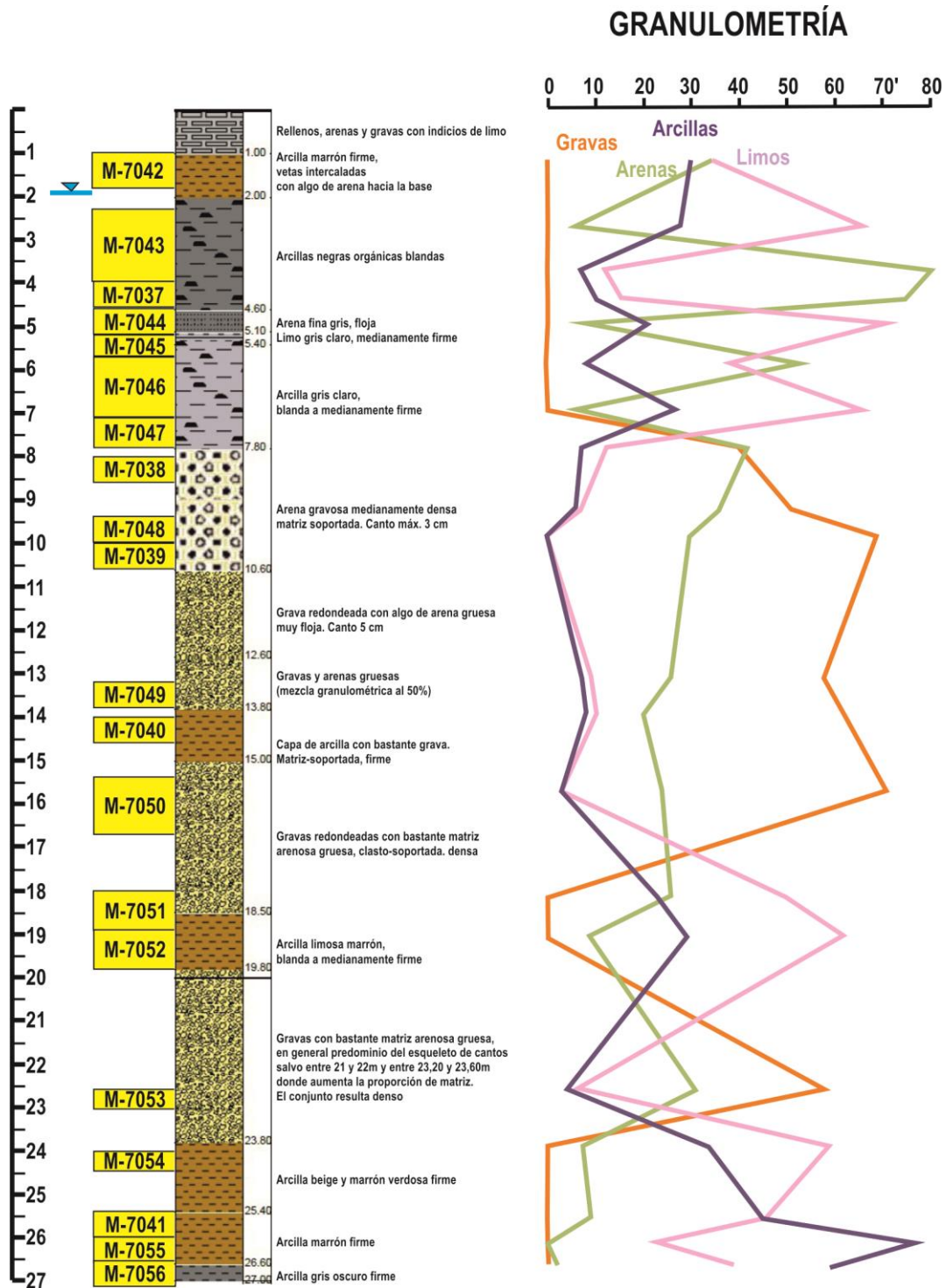


Figura IV-6: Variación con la profundidad de la composición granulométrica de los materiales estudiados en laboratorio

IV.2.5.2 Composición mineralógica y características químicas

Se han realizado análisis mineralógicos mediante difracción de rayos-X con el fin de conocer las fases predominantes en cada muestra. Además, se han determinado los contenidos de carbonatos, sulfatos y materia orgánica mediante sus correspondientes ensayos normalizados. Se resumen en la Tabla IV-3 los resultados obtenidos, ordenados en función de la posición de la muestra en el testigo y su profundidad. Por razones de simplificación, sólo se muestran las fases minerales mayoritarias.

Tabla IV-3: Composición mineralógica y propiedades químicas de las muestras estudiadas en laboratorio

Muestra	Ubicación		Mineralogía				Química		
	Prof.inicial	Prof. Final	Cuarzo	Calcita	Dolomita	Arcillas	Carbonatos	Sulfatos	M.O.
M-7042	1	1,8	16	47	3	32	37,3	0,16	0,66
M-7043	2,6	4	18	50	3	27	46,5	0,18	1,41
M-7037	4	4,6	21	37	0	35	35,6	0,08	0,72
M-7044	4,6	5,3	49	33	4	13	38,1	0,15	0,9
M-7045	5,3	5,7	25	45	6	20	43,8	0,13	0,72
M-7046	5,7	7,1	29	53	3	11	38,9	0,15	0,6
M-7047	7,1	7,8	23	47	4	24	42,7	0,09	1,17
M-7038	8	8,6	39	59	1	1	57,8	0,15	0,09
M-7048	9,4	10	31	66	2	1	47,8	0,07	0,06
M-7039	10	10,6	19	75	2	1	73,2	0,12	0,06
M-7049	13,2	13,8	14	71	4	3	73,6	0,06	0,36
M-7040	14	14,6	33	58	1	7	66,2	0,13	0,06
M-7050	15,4	16,7	14	80	1	4	65,5	0,08	0,06
M-7051	18	18,9	30	44	1	22	46	0,08	0,06
M-7052	18,9	19,8	19	56	0	22	42,5	0,14	0,06
M-7053	22,6	23	14	86	0	0	64,1	0,18	0,06
M-7054	24	24,2	15	53	0	29	46,7	0,15	0,06
M-7041	25,4	26	40	44	3	8	42,5	0,14	0,06
M-7055	26	26,5	8	30	0	60	30,5	0,16	0,18
M-7056	26,5	27	13	40	0	45	41,2	0,16	1,2

En la Figura IV-7 se representa la variación de la composición mineralógica y características químicas, en función de la profundidad. Por razones de simplificación, sólo se muestran las fases minerales mayoritarias.

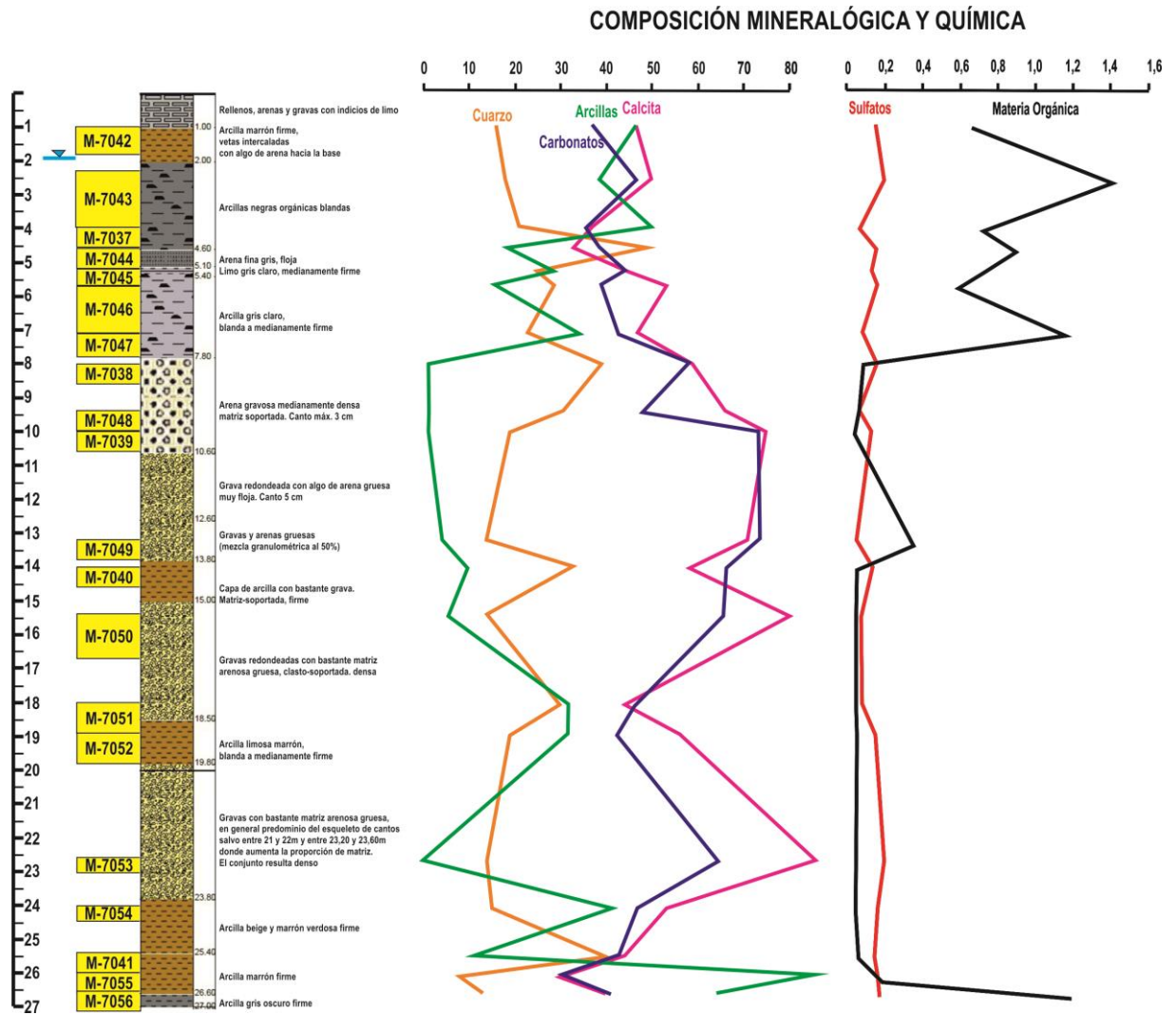


Figura IV-7: Variación con la profundidad de la composición mineralógica y propiedades químicas de las muestras estudiadas en laboratorio

IV.2.5.3 Medida de la conductividad térmica en laboratorio

Paralelamente, se ha tomado otra serie de muestras del testigo del sondeo con la finalidad de medir la conductividad térmica mediante dos métodos de laboratorio:

- Método de la aguja simple: según indicaciones de la Norma ASTM D 5334-08: “Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure”
- Método de la aguja doble: descrito por Bristow et al. (1994)

En todas ellas se midieron los parámetros necesarios para su correcta identificación y clasificación (Tabla IV-4): densidad aparente (γ_{ap}), densidad seca (γ_d), contenido de humedad (W%) y peso específico de las partículas sólidas (γ_s), con los que se calcularon su grado de saturación (Sr), porosidad (n) y índices de huecos (e).

Tabla IV-4: Parámetros de identificación y clasificación geotécnica de las muestras utilizadas para la determinación de la conductividad térmica en laboratorio

	Profundidad (m)		USCS	γ_{ap} (ton/m ³)	W(%)	γ_d (ton/m ³)	γ_s	e	n	Sr (%)
M-7411	1,2	1,3	CL	2,05	17,14	1,75	2,67	0,53	0,35	87
M-7412	3,2	3,4	CL	1,85	17,20	1,58	2,66	0,68	0,40	67
M-7413	3,8	3,9	CL	2,02	19,81	1,69	2,66	0,54	0,35	92
M-7414	4,8	5,0	SM	2,09	19,05	1,76	2,67	0,52	0,34	98
M-7415	5,5	5,6	ML	1,98	13,33	1,75	2,67	0,53	0,35	68
M-7416	6,0	6,2	SC	1,77	3,45	1,71	2,67	0,56	0,36	16
M-7417	7,4	7,55	CL	1,87	22,00	1,53	2,67	0,75	0,43	79
M-7418	9,4	9,6	SW	2,00	0,00	2,00	2,68	0,34	0,25	0
M-7419	12,6	13,2	GM	2,26	1,60	2,22	2,69	0,21	0,17	20
M-7420	14,0	14,2	GM	2,25	0,50	2,26	2,67	0,18	0,15	7
M-7421	19,2	19,4	CL	2,12	18,45	1,79	2,69	0,50	0,33	100
M-7422	20,8	21,2	GP-GM	2,32	2,94	2,25	2,68	0,19	0,16	41
M-7423	21,6	21,8	GW-GM	2,33	3,66	2,25	2,68	0,19	0,16	51
M-7424	24,5	24,6	CL	2,19	13,01	1,94	2,67	0,38	0,28	92
M-7425	26,8	27,0	CL	1,92	14,29	1,68	2,66	0,58	0,37	65

La Figura IV-8 representa los resultados de conductividad térmica medida en diferentes posiciones y con los dos tipos de sensores sobre algunas de las muestras objeto de estudio. En todos los casos los tiempos de registro fueron de 10 minutos y los tiempos de equilibrio fueron suficientes para garantizar mediciones confiables. Las probetas fueron analizadas en condiciones naturales, es decir, densidades aparentes, contenidos de humedad, grado de saturación que se presentaron en la tabla anterior.



Figura IV-8: Esquema de resultados de conductividad térmica de las muestras en función del tipo de sonda y posición en la probeta

Se resumen en la Tabla IV-5 los valores obtenidos en todas las probetas en función de la posición y el tipo de sonda. Se añaden finalmente los valores de promedio y desviación estándar obtenidos en cada material.

Tabla IV-5: Resumen de resultados de conductividad térmica según la posición y tipo de sonda. En la parte inferior se muestran los valores estadísticos.

	Posicion	M-7411	M-7412	M-7413	M-7414	M-7415	M-7416	M-7417	M-7421	M-7424	M-7425
	1	1,698	1,54	1,604	1,987	1,544	1,592	1,606	1,903	2,042	1,508
	2		1,514	1,66		1,766	1,457	1,698	1,702	2,026	1,571
	3		1,41	1,04		1,337	1,067	1,421	1,272	1,622	1,48
	4	1,702	1,518	1,534	2,556	1,604	1,321	1,656	1,806	2,149	1,512
	5	1,366	1,506	1,583		1,67		1,352	1,877	1,637	1,491
	6	1,755	1,645	1,782	2,535	1,687	1,458	1,484	1,957	2,161	1,531
	7	1,631	1,4	1,657	2,605	1,665	1,578	1,638	1,997	2,23	1,471
	8	1,679	1,387	1,403	2,84	1,728	1,442	1,68	1,753	2,129	
Aguja simple	Promedio	1,589	1,490	1,533	2,505	1,625	1,416	1,567	1,783	2,000	1,509
	Desv. Est	0,193	0,051	0,252	0,402	0,161	0,224	0,152	0,258	0,247	0,035
Aguja doble	Promedio	1,688	1,477	1,614	2,660	1,693	1,493	1,601	1,902	2,173	1,501
	Desv. Est	0,063	0,145	0,193	0,160	0,032	0,074	0,103	0,131	0,052	0,042
TOTAL	Promedio	1,639	1,490	1,533	2,505	1,625	1,416	1,567	1,783	2,000	1,509
	Desv. Est	0,139	0,087	0,227	0,314	0,135	0,179	0,130	0,229	0,237	0,034

A partir de todos los resultados de los ensayos desarrollados hasta el momento se elaboró una tabla resumen presentando los rangos de valores obtenidos, en función de su densidad seca y del grado de saturación (Tabla IV-6). En la Figura IV-9 se puede observar la conductividad térmica medida en laboratorio respecto a la profundidad de la muestra correspondiente. Este perfil permitirá estudiar la variación de esta propiedad a lo largo del sondeo. Dado que todas las muestras se encuentran por debajo del nivel freático, se puede asumir que se encuentran en estado saturado o cercano a la saturación (>80%).

Tabla IV-6: Valores de conductividad térmica de las muestras ensayadas

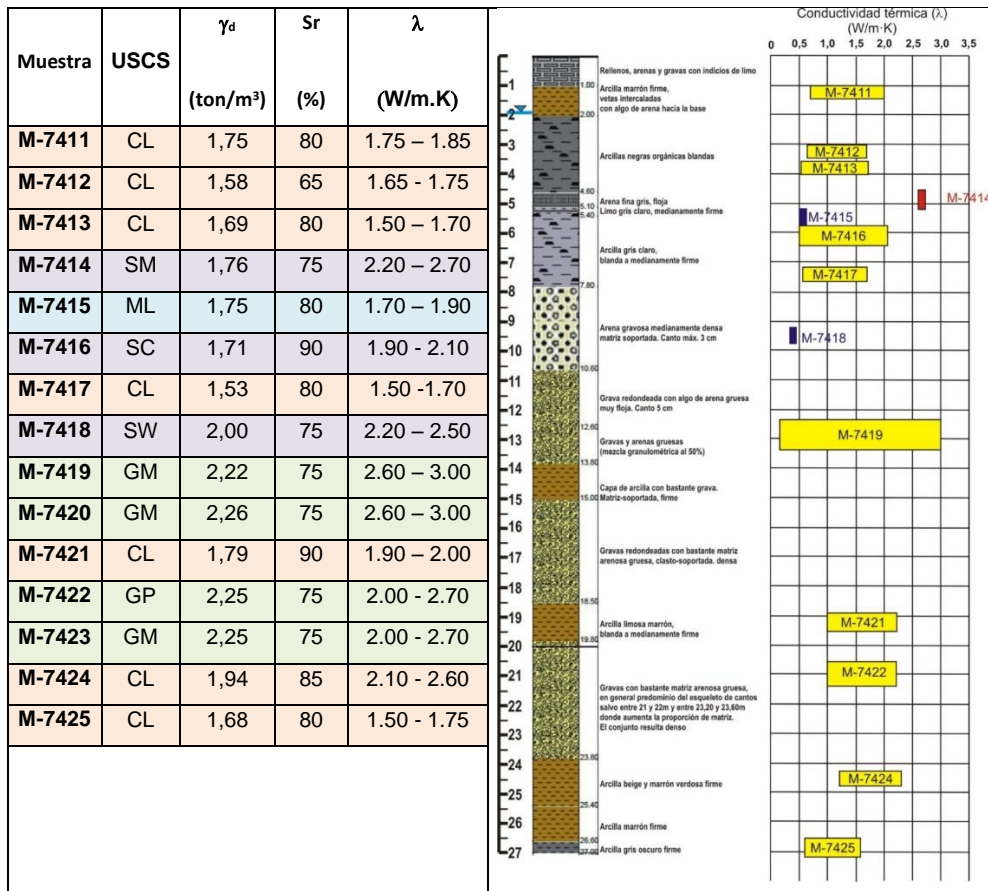


Figura IV-9: Perfil estratigráfico de la perforación y resultados de conductividad térmica de las muestras seleccionadas para condiciones de saturación $s_r=0\%$ a $S_r = 100\%$.

A modo de resumen, se representa en la Figura IV-10 la variación en profundidad de los siguientes parámetros identificativos de las muestras: conductividad térmica, composición mineralógica (fases predominantes), características químicas (carbonatos, sulfatos y materia orgánica) y composición granulométrica (composición relativa de gravas, arenas, limos y arcillas).

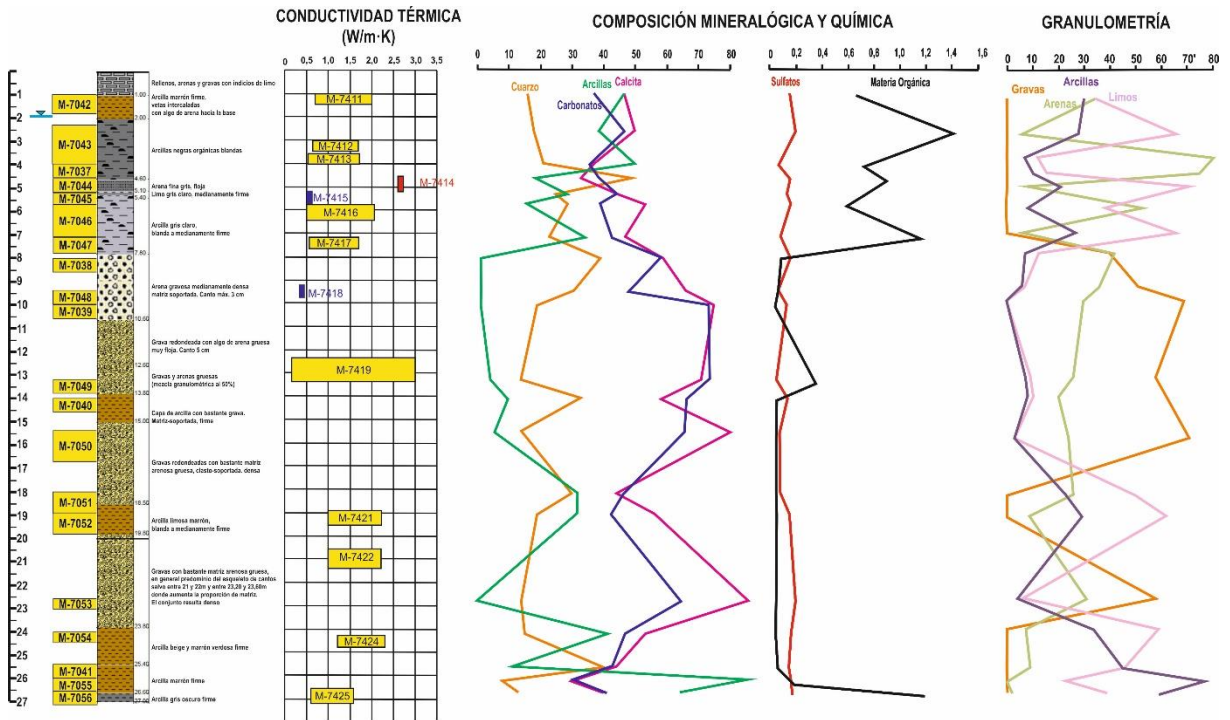


Figura IV-10: Perfil estratigráfico de la perforación y resultados de conductividad térmica composición química, mineralógica y granulométrica.

IV.2.6 Datos geotécnicos de informes de localizaciones cercanas

Con el fin de completar la información geotécnica del terreno, se han consultado informes geotécnicos de campañas realizadas en las inmediaciones del emplazamiento del pilote estudiado. La cercanía de la localización de estos informes geotécnicos consultados y la confirmación de que atraviesan los mismos estratos geológicos, ha permitido extraer de éstos los valores geotécnicos que no ha sido posible determinar directamente en este estudio. De esta forma, a partir de los datos aportados por los diferentes reconocimientos realizados, junto a los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados sobre las muestras extraídas de los sondeos, se ha podido definir la estratigrafía del subsuelo reconocido y determinar la naturaleza y las características tenso-deformacionales de los estratos diferenciados, asignando a cada uno de ellos sus correspondientes parámetros geotécnicos. Los valores de resistencia a compresión simple (q_u) corresponden a determinaciones mediante penetrómetro de bolsillo, mientras la resistencia al corte sin drenaje (c_u) corresponde a mediciones con molinete de bolsillo. La Tabla IV-7 resume las principales propiedades geotécnicas y geotérmicas de los niveles atravesados por el pilote.

Tabla IV-7: Propiedades geotécnicas y geotérmicas de los niveles atravesados por el pilote

Profundidad	Litología	Propiedades geotécnicas	Propiedades térmicas
0 – 1,00	Rellenos	ρ ap 1,80 t/m ³ Cohesión: C' = 0 kPa Ángulo de Rozamiento Interno: $\varphi= 28^\circ$	
1,00 – 2,00	Limos arcillosos marrones desecados	ρ ap natural 2,0 t/m ³ ρ ap seca 1,70 t/m ³ Cohesión: C' = 1 kPa Ángulo de Rozamiento Interno: $\varphi= 26^\circ$ Compresión simple: $q_u = 60$ kPa Resistencia al corte sin drenaje: $c_u = 30$ kPa Módulo de elasticidad E = 5000 kPa Coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$ Permeabilidad: K = 10 ⁻⁵ m/s Resistencia unitaria por punta σ_{fh} – Resistencia por fuste: $\tau_{fh} = 25$ kPa	$\lambda = 0,77$ W/m·K $C_v = 1,269$ MJ/(m ³ ·K) $D = 0,463$ mm ² /s
N.F. ▽			
2,00 – 7,80	Arcillas a arcillas limosas saturadas	ρ ap natural 1,90 t/m ³ ρ ap seca 1,50 t/m ³ Cohesión: C' = 5 kPa Ángulo de Rozamiento Interno: $\varphi= 26^\circ$ Compresión simple: $q_u = 40$ kPa Resistencia al corte sin drenaje: $c_u = 20$ kPa Módulo de elasticidad E = 3000 kPa Coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$ Permeabilidad: K = 10 ⁻⁵ m/s Resistencia unitaria por punta σ_{fh} – Resistencia por fuste: $\tau_{fh} = 15$ kPa	$\lambda = 1,611$ W/m·K $C_v = 2,513$ MJ/(m ³ ·K) $D = 0,652$ mm ² /s
7,80 – 26,0	Gravas y arenas (% bolos y matriz variable)	ρ ap Natural 2,20 t/m ³ ρ ap Seca 2,00 t/m ³ Cohesión: 0 - 20 kPa (según matriz) Ángulo de Rozamiento Interno: $\varphi= 35^\circ$ Compresión simple: $q_u = 100$ kPa Resistencia al corte sin drenaje: $c_u = 30 - 50$ kPa Módulo de elasticidad E = 50.000 – 100.000 kPa Coeficiente de Poisson $\nu = 0,25 - 0,30$ Permeabilidad: K = 10 ⁻⁴ m/s Resistencia unitaria por punta σ_{fh} : 5500 kPa Resistencia por fuste: $\tau_{fh} = 75$ kPa	$\lambda = 3,267$ W/m·K $C_v = 1,593$ MJ/(m ³ ·K) $D = 1,453$ mm ² /s
Niveles 13,80 – 15,00 – 18,50 – 19,80 – 23,80 – 26,60	Arcillas limosas de consistencia firme	ρ ap Natural 1,90 t/m ³ ρ ap Seca 1,65 t/m ³ Cohesión: C' = 28 kPa Ángulo de Rozamiento Interno: $\varphi= 26^\circ$ Compresión simple: q_u : 60 kPa Resistencia al corte sin drenaje: $c_u = 20 - 30$ kPa Módulo de elasticidad E = 5000 kPa Coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$ Permeabilidad: K = 10 ⁻⁶ m/s Resistencia unitaria por punta σ_{fh} : 450 kPa Resistencia por fuste: $\tau_{fh} = 20 - 35$ kPa	$\lambda = 1,872$ W/m·K $C_v = 2,380$ MJ/(m ³ ·K) $D = 0,775$ mm ² /s

IV.3 DISEÑO DEL ENSAYO

Como ya se ha explicado anteriormente, el objetivo principal de esta tesis consiste en analizar el comportamiento real de un pilote prefabricado sometido al efecto combinado y simultáneo de solicitaciones mecánicas y térmicas. Para ello, fue necesario en primer lugar realizar un importante esfuerzo en diseñar el experimento en términos de:

- **Diseño de pilote**, características geométricas, instalación interna del circuito geotérmico e instalación de instrumentación para medida y registro de su comportamiento.
- **Diseño del sistema de aplicación de solicitaciones mecánicas**. Equipamiento necesario para la generación de cargas mecánicas, procedimiento experimental y registro de datos.
- **Diseño del sistema de aplicación de solicitaciones térmicas**. Equipamiento necesario para la generación de cargas térmicas, procedimiento experimental y registro de datos.

Se describen a continuación estos tres aspectos, desarrollando en cada apartado el diseño geométrico del pilote y de cada sistema, los dispositivos necesarios para la realización del ensayo, la secuencia de fases experimentales y la toma de datos programada. Cabe destacar en este último aspecto, la importancia crucial de la correcta definición de un “cero” temporal y frecuencia de registro común en todos los sistemas de adquisición de datos que permitan un análisis posterior de los valores de diferentes orígenes garantizando su relación espacio-temporal en la evolución del comportamiento observado.

IV.3.1 *Diseño del pilote*

La presencia de espesores grandes de suelos blandos próximos a la superficie permite aprovechar el local escogido para considerar, como sistema de cimentación, una cimentación profunda a base de pilotes prefabricados.

El elemento de cimentación profunda previsto y empleado en este proyecto es un pilote prefabricado hincado. Su ejecución implica el desplazamiento del terreno y ello puede inducir un cierto aumento de la compacidad del mismo. En vista de los resultados de la prospección geotécnica realizada en el local, concretamente el

ensayo de penetración DPSH (Figura IV-4) y el sondeo llevado a cabo, con el análisis de las muestras tomadas y los ensayos SPT, se puede concluir que en el perfil geotécnico del terreno deben distinguirse dos zonas, fundamentalmente: hasta una profundidad de aproximadamente 8 metros predominan los suelos arcillosos blandos, con golpes del DPSH inferiores a 10, y con algunos niveles prácticamente nulos (entre 1 m y 1,5 m; entre 2,4 m y 3, 6 m); por debajo de los 8 metros, y hasta los 24 m, aproximadamente, el terreno está formado por materiales predominantemente granulares, arenas y gravas, con golpes medios del ensayo DPSH de 19 entre las profundidades de 8 y 15 metros, aumentando a 59 de media entre los metros 15 y 16, para alcanzar rechazo a los 16-16,5 metros de profundidad. Los dos ensayos SPT realizados entre los 15 y los 19 metros dan valores de 40 y 41.

Como consecuencia de lo anterior, se adopta que la longitud mínima ha de ser de 17 m para el pilote prefabricado. Se define una sección cuadrada de 0,35 metros de lado, que es suficiente para la introducción de las sondas geotérmicas y para garantizar una mínima distancia entre ellas en el interior del pilote.

La capacidad portante del pilote frente a carga verticales se ha estimado calculando su carga de hundimiento (Q_h) mediante los procedimientos incluidos en Documento Básico–Seguridad Estructural-Cimientos del Código Técnico de la Edificación (Documento Básico SE-C, 2006), visto que sería para obras de edificación para las que se destina, fundamentalmente, el estudio de aprovechamiento geotérmico de pilotes prefabricados hincados. La capacidad portante del pilote frente a cargas verticales se considera la suma de la carga por punta (Q_p) y la carga por fuste (Q_f).

$$Q_h = Q_p + Q_f$$

Resistencia por punta

La resistencia unitaria por punta se ha evaluado por el método basado en el ensayo SPT.

Ecuación IV-1

$$q_p = f_N \cdot N_{SPT} \text{ (MPa)}$$

Donde:

q_p es la carga de hundimiento unitaria por punta

$f_N = 0,4$, para pilotes hincados

N_{SPT} es el valor medio de N_{30} , a partir de la media de la zona activa inferior y de la media de zona pasiva superior. A partir de los ensayos en el sondeo, se ha considerado un $N_{SPT} = 40$.

De esta manera, resulta un valor de q_p de 16 MPa. Multiplicando por el área transversal del pilote resulta una resistencia por punta de: $Q_p = 199,8$ t.

La resistencia unitaria por fuste se calcula también a partir de las formulaciones analíticas incluidas también en el Código Técnico de la Edificación, en concreto, la Ecuación IV-2, para suelos granulares (y suelos finos a largo plazo):

Ecuación IV-2

$$\tau_f = \sigma'_v \cdot k_f \cdot f \cdot \text{tg}\phi \leq 120 \text{ kPa}$$

Donde

τ_f es la resistencia unitaria por fuste al nivel considerado.

σ'_v es la presión vertical efectiva al nivel considerado

k_f es el coeficiente de empuje horizontal ($k_f = 1$, para pilotes hincados)

f es el factor de reducción del rozamiento del fuste ($f = 0,9$, para pilotes prefabricados de hormigón)

ϕ es el ángulo de rozamiento interno del suelo granular

y la Ecuación IV-3, para suelos finos, a corto plazo:

Ecuación IV-3

$$\tau_f = \frac{100c_u}{100 + c_u} (\tau_f \text{ y } c_u \text{ en kPa})$$

donde c_u es la resistencia al corte sin drenaje del suelo limoso o arcillosos.

A efectos de determinar la resistencia unitaria por fuste, se divide la profundidad que alcanza el pilote en los cuatro tramos de la Tabla IV-8. Se adopta, a partir de los resultados de la prospección efectuada (específicamente a partir de los golpes de los ensayos SPT y DPSH) un ángulo de rozamiento de 31° para los niveles granulares entre 8 y 15 metros, y de $38,9$ para el nivel entre los 15 y los 17 metros de profundidad. Los pesos específicos se determinan a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio sobre las muestras tomadas del sondeo; el nivel freático se considera situado a la profundidad de 2 m; la cohesión no drenada de los materiales

finos en los 8 primeros metros se estima a partir de los datos de informes geotécnicos en zonas próximas.

Tabla IV-8: Resistencia por fuste

Profundidad	0 a 2 m	2 a 8 m	8 a 15 m	15 a 17 m
γ' (kN/m ³)	20,1	9,09	11,35	11,35
σ'_v (kPa), punto medio del tramo	20,1	67,47	134,46	185,5
ϕ' (°)	-	-	31	38,9
c_u , kPa	30	20	-	-
τ_f (kPa), corto plazo	23	16,7	-	-
τ_f (kPa), largo plazo	-	-	72,71	120
Q_f (kN)	64,4	140,28	712,58	336

Resulta, por lo tanto, una resistencia por fuste del pilote de 127,7 t, la cual, si se desprecia la resistencia por fuste en los niveles arcillosos, queda reducida a 106,8 t.

Utilizando el procedimiento de determinación de la resistencia por fuste de los niveles granulares a partir de los ensayos SPT mediante la Ecuación IV-4 (Documento Básico SE-C, 2006), y considerando un N_{SPT} medio de 13,5 en el tramo de 8 a 15 metros, y de 40 en el tramo de 15 a 17 metros, la resistencia por fuste del pilote, despreciando la contribución de los niveles arcillosos blandos, resulta de 62,25 t, inferior a la determinada mediante la fórmula analítica.

Ecuación IV-4

$$\tau_f = 2,5 \cdot N_{SPT} \text{ (kPa)}$$

En todo caso, con las resistencias por punta ($Q_p = 199,8$ t) y por fuste ($Q_f =$ entre 62 y 107 t) obtenidas, fue considerada adecuada una carga vertical de servicio de 100 t, que fue la aplicada sobre el pilote experimental.

IV.3.2 Diseño del ensayo: Solicitaciones térmicas

Dentro del diseño experimental del estudio, en este apartado se definieron las características y duración de los ensayos térmicos en términos de ciclos de

inyección/extracción de calor, secuencia de escalones de potencia inyectada por longitud de pilote (W/m), duración de cada escalón, etc. Los objetivos de estos ensayos de aplicación de diferentes potencias térmicas de manera controlada son:

- Simular la utilización del pilote como elemento de una instalación geotérmica funcionando en modo calefacción y refrigeración
- Obtener la respuesta térmica del pilote bajo solicitaciones térmicas cíclicas
- Caracterizar el comportamiento térmico del pilote
- Analizar la influencia de esta solicitación cíclica en su comportamiento a largo plazo.

IV.3.2.1 Sistema de aplicación de cargas térmicas

Con el fin de poder inyectar o extraer calor del pilote simulando su utilización como elemento geotérmico, debe construirse adyacente al pilote hincado una instalación de climatización compuesta por una bomba de calor reversible capaz de producir agua caliente y fría. Este fluido, a través de una bomba de circulación y un sistema hidráulico, circula por el interior del pilote termoactivo intercambiando calor con el terreno circundante del mismo modo que se realiza en una instalación de climatización geotérmica. En este caso se determina la necesidad de:

- Generación de frío y calor mediante bomba de calor reversible
- Regulación de la potencia inyectada o extraída
- 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 forzaron pulsos de inyección de calor o pulsos de extracción de calor en un bucle cerrado y se midió su respuesta en temperatura. De esta forma, se obtuvieron experimentalmente las características térmicas del sistema pilote-terreno, lo que constituye una alternativa más rigurosa y fiable que las estimaciones basadas en descripciones del hormigón y del suelo mediante valores tabulados y mapas geológicos, al incorporar más información y más precisa.

El funcionamiento del equipo de generación térmica se basa en un proceso totalmente autónomo gracias a un diseño íntegramente automatizado que permite 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, permite la configuración y adquisición de datos de forma remota mediante transmisiones GSM.

Los principales componentes del sistema son (Figura IV-11): una bomba de calor reversible, un depósito y un tanque purgador, una válvula de tres vías para regular la temperatura del agua inyectada, un medidor de flujo y varios medidores de temperatura.

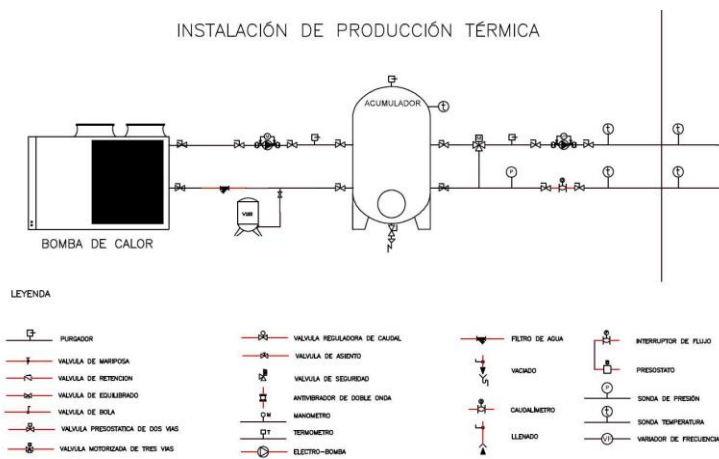


Figura IV-11: Diseño del sistema de aplicación de cargas térmicas en el pilote

El sistema dispone de dos ciclos de flujo de agua:

- **El ciclo primario**, que contiene el pilote, la válvula reguladora y la bomba de circulación primaria regulable.
- **El ciclo secundario**, que contiene la bomba de calor, el tanque de almacenamiento, la válvula reguladora y la bomba de circulación secundaria.

El ciclo primario se encarga de mantener un suministro de potencia constante al suelo y los pulsos de inyección y extracción extremos alternativos. Para ello el circuito secundario suministra agua, calentada o enfriada por la bomba de calor, al circuito primario a través de la válvula reguladora que mantiene constante el salto térmico en

el primer caso y genera los pulsos mediante aperturas completas en el segundo. El caudal que circula por el ciclo primario se regula modificando las revoluciones de la bomba de circulación. Al disponer de un depósito de acumulación es posible regular de forma eficaz la temperatura que suministra el sistema y por tanto proporcionar la temperatura requerida para el suministro de la potencia constante, sin estar sujeto a variaciones térmicas, a diferencia de la potencia térmica suministrada por una resistencia, que dependería del suministro eléctrico.

Todo el sistema se integra en un remolque, siendo por lo tanto un equipo móvil y transportable que permite realizar medidas de conductividad térmica en diferentes localizaciones.

La regulación de la potencia inyectada al pilote se realiza 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 para aumentar o disminuir la contribución de agua procedente del circuito secundario, con el objetivo de mantener las premisas del experimento que se está desarrollando.

La gestión del dispositivo se realizará 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 se verán cada uno de los dispositivos del sistema, así como algunos de los datos fundamentales del experimento, temperaturas de entrada y salida, temperatura del suelo, temperatura del tanque y temperatura ambiente.

IV.3.2.2 *Secuencia de ensayos térmicos*

Se han diseñado dos tipos diferentes de ensayos térmicos:

- **Ensayos previos**, con el fin de comprobar el comportamiento térmico del sistema pilote-suelo en condiciones reales y bajo la acción de una carga mecánica. Con este ensayo es posible identificar las propiedades térmicas inherentes al pilote, incluyendo su conductividad térmica. Para ello se realizará un ensayo de respuesta térmica en el propio pilote durante 15 días empleando 3 potencias diferentes, según el esquema siguiente (Figura IV-12).

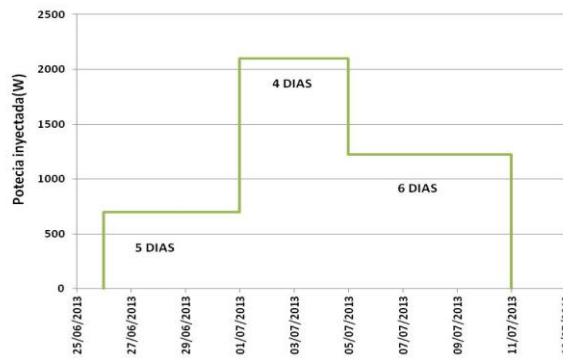
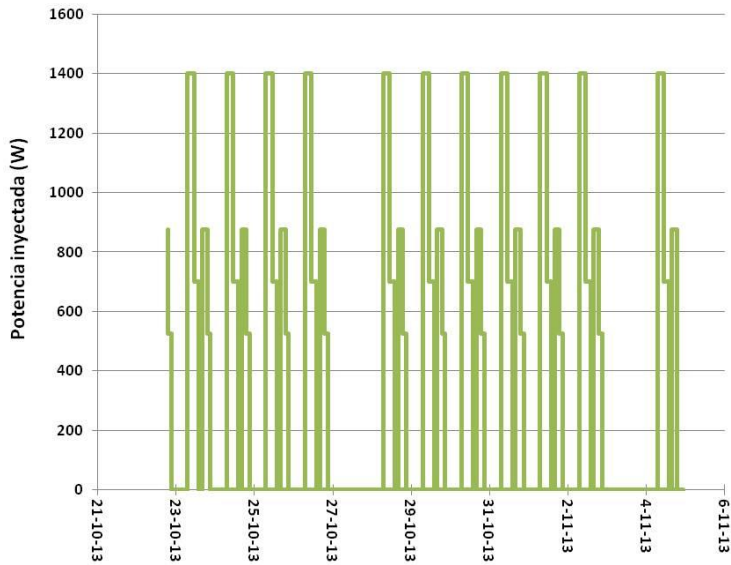


Figura IV-12. Esquema de potencia a inyectar durante el primer ensayo térmico

- **Ensayos de carga de servicio**, para comprobar el comportamiento del pilote ante una carga térmica que simularía su uso en una instalación geotérmica real y bajo la carga mecánica actual durante un periodo de 15 días. En la Figura

IV-13 se puede observar el perfil diario de este tipo de ensayos y en la



- Figura IV-14 la secuencia completa de potencias inyectadas a lo largo de los 15 días, con 2 periodos de descanso en domingo sin inyección de potencia.

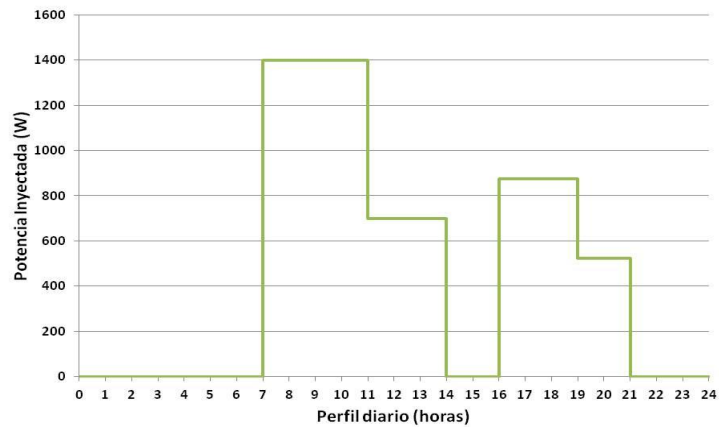


Figura IV-13. Perfil diario de potencia a inyectar durante el segundo ensayo térmico

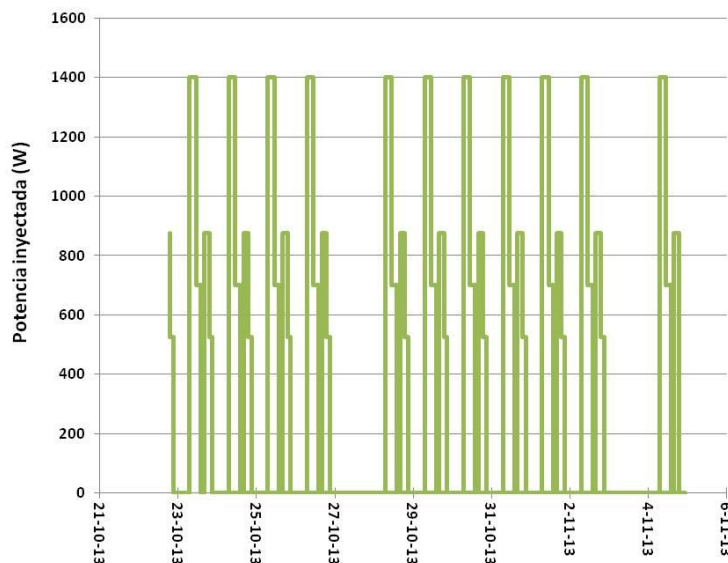


Figura IV-14. Esquema de potencia a inyectar durante los 15 días de duración del segundo ensayo térmico

IV.3.3 Diseño del ensayo: *Solicitud mecánica*

Se diseñó un sistema de aplicación de la carga mecánica con el fin de simular las solicitaciones mecánicas a las que pudiera estar sometido durante una hipotética vida útil. Con este sistema, y previamente al comienzo de los ensayos térmicos se realizarán dos ensayos de carga estática para ver la distribución de tensiones en el pilote.

IV.3.3.1 Sistema de aplicación de carga mecánica

La simulación de las cargas mecánicas estáticas que pudiera tener un pilote de cimentación de una estructura de edificación cualquiera requiere de la aplicación de una carga constante que se decidió fijar en un valor promedio de 100 t. Para simular las solicitaciones mecánicas se ha empleado un bastidor metálico en forma de “T” anclado al terreno por tres puntos que actúa a modo de elemento de reacción. Este anclaje al terreno se ha realizado mediante 3 anclajes activos de barra tipo “Gewi” que trabajan a tracción. A modo de resumen, las características de estos anclajes son:

- 3 Anclajes activos provisionales de barra roscada tipo Gewi
- Límite elástico del acero 500 Mpa

- Diámetro 40 mm
- Inyección Única Global
- Inclinación 5°
- Diámetro de perforación 140 mm.
- Cemento Cem II 32,5 N

El resto de elementos que conforman el sistema de aplicación de la carga mecánica son (Figura IV-15):

- **Bastidor metálico.** Este bastidor fue diseñado para asumir cargas superiores a las del trabajo del pilote (1000 kN) y su comportamiento ha sido comprobado y aprobado en diversos ensayos de carga realizados por la empresa Grupo Rodio-Kronsa (GRK). La misión del bastidor es la de transmitir las cargas desde los anclajes al pilote termoactivo. Para este proyecto en particular fue necesario la fabricación de unas patas especiales para el bastidor, más esbeltas y altas que las empleadas habitualmente para no interferir con los anclajes de barra empleados (inclinación de 5°) y para permitir la disposición del castillete, célula de carga y gato hidráulico necesarios para la prueba.
- **Castillete metálico.** Este castillete o “caballete” actuó a modo de sufridera, repartiendo la carga proveniente del gato hidráulico sobre la cabeza del pilote y permitiendo al mismo tiempo, la salida de las sondas geotérmicas por el hueco central del mismo. Fue conformada por placas de acero de espesor mínimo de 25 mm unidas mediante cordón de soldadura continuo.
- **Gato hidráulico.** Se ha empleado un cilindro hidráulico de alta capacidad Power Team de acción simple y retorno por carga modelo R1506C.
- **Célula de carga**

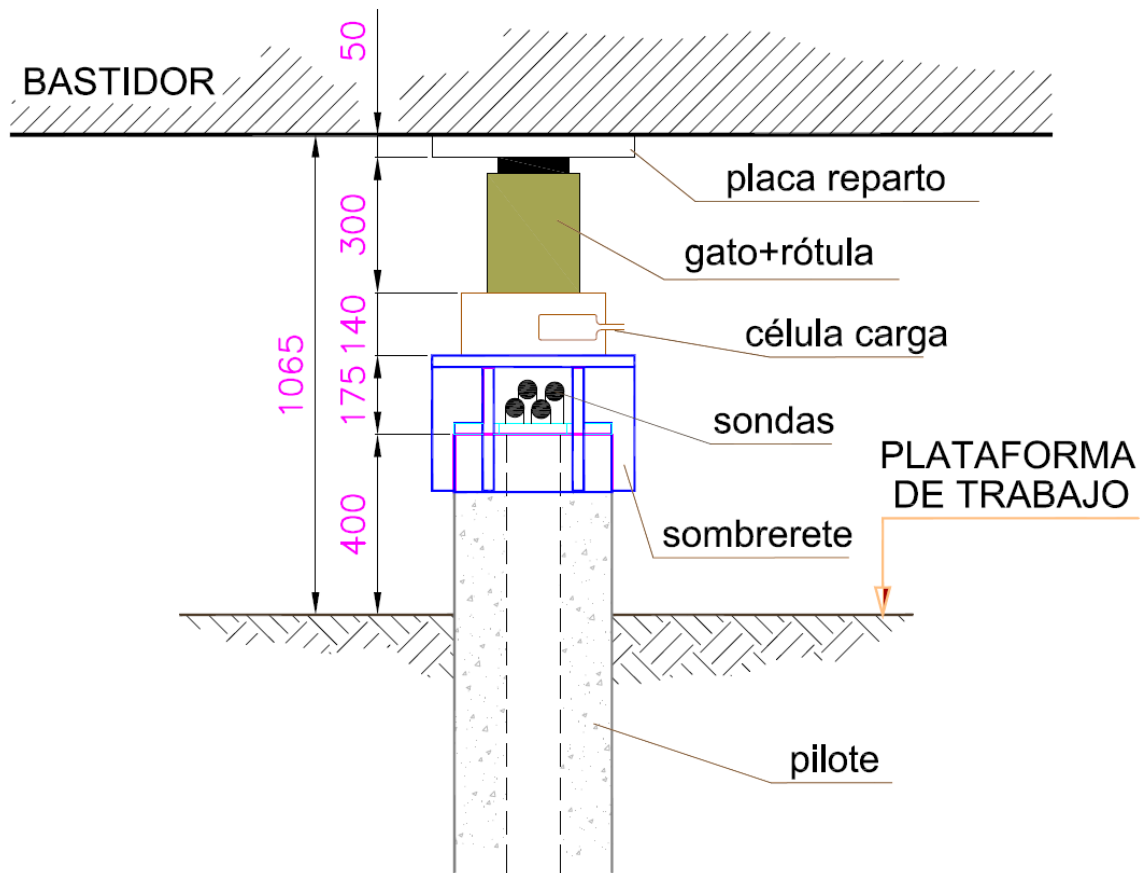


Figura IV-15. Esquema de montaje de los distintos elementos que conforman el sistema de aplicación de la carga mecánica

IV.3.3.2 Secuencia de ensayos mecánicos

Se diseñó un ensayo de carga estática, compuesto por una secuencia de cargas mecánicas que definen una serie de ciclos ascendentes (aumento progresivo de la carga estática) y descendentes (descenso progresivo de la carga estática), con el fin de estudiar el comportamiento geotécnico del pilote en su estado original, es decir, antes de la aplicación de cargas térmicas. El ensayo de carga estática tuvo una duración de 24 horas siguiendo el esquema que se muestra en la Figura IV-16.

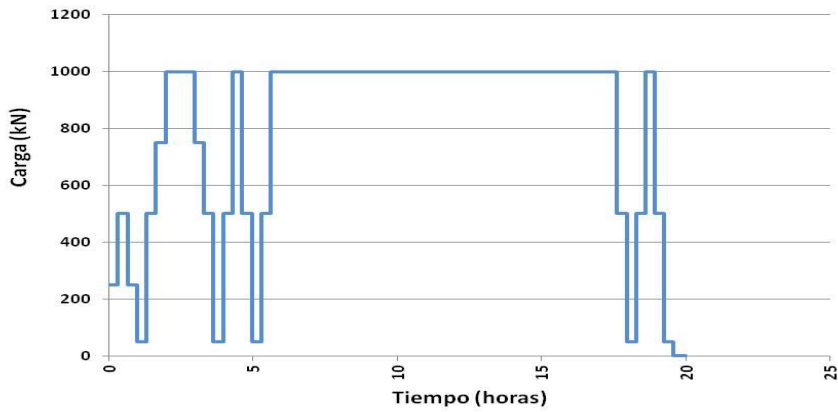


Figura IV-16. Esquema del ensayo de carga estática

Durante esta prueba de carga estática, los sensores de fibra óptica se salieron de rango. Ello obligó a una manipulación del sistema de adquisición de datos para volver a activarlos y hacerlos útiles en los rangos de medida del ensayo. Tras esta necesaria modificación, y con el fin de analizar la fiabilidad de las medidas obtenidas con los dos tipos de instrumentación utilizados, (extensómetros de cuerda vibrante y sensores de fibra óptica), se realizó una segunda prueba de carga estática. Esta segunda prueba, de cinco horas de duración, se realizó justo antes del comienzo de la aplicación de cargas térmicas, siguiendo el esquema que se muestra en la Figura IV-17.

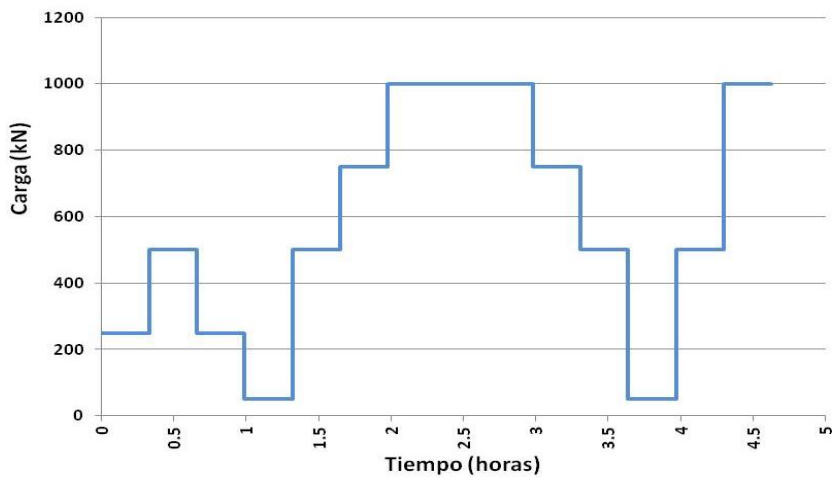
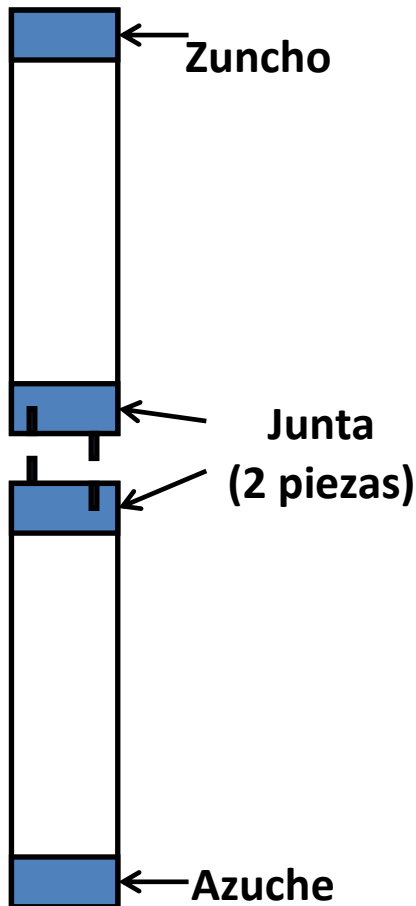


Figura IV-17. Esquema de carga aplicada durante el segundo ensayo de carga estática

IV.4 CONSTRUCCIÓN DEL PILOTE

El pilote termoactivo objeto de estudio en esta tesis, construido en la factoría de pilotes de GRK de San Sebastián de los Reyes (Madrid), consiste en un pilote prefabricado hueco de sección cuadrada HCK-350, con las siguientes características (Figura IV-18):



- Lado: 350 mm
- Longitud: 2 tramos de pilote empalmables mediante junta de 8,70 m de longitud cada uno, tramos azuche (ciego)-junta y junta-zuncho (pasante). Longitud total de 17,40 m
- Hueco interior conformado mediante vaina de acero de diámetro 120 mm y 2 mm de espesor
- Sección completa aproximada 1262,00 cm² (hueco de 113,10 cm²)
- Instrumentación: 16 sensores de fibra óptica, 14 extensómetros de cuerda vibrante y 10 bandas extensométricas

Figura IV-18: Esquema pilote empleado.HCK-350

El armado del pilote HCK-350 consiste en una armadura longitudinal compuesta por 8Ø16 con una espiral Ø6 cada 10 cm, dispuesta según croquis adjunto. El acero de las armaduras longitudinales y transversales es corrugado, de dureza natural y del tipo B-500 SD, soldable con características especiales de ductilidad, de límite elástico no menor de 500 N/mm². Estas armaduras cumplen con la EHE y el CTE (Figura IV-19).

Para el alojamiento de la sonda geotérmica se ha previsto un hueco central circular de 120 mm de diámetro que se ha conformado mediante un encofrado metálico cilíndrico perdido centrado con la sección del pilote. La vaina de acero es de 120 mm de diámetro interior con un espesor de 2 mm, suficiente para resistir el hormigonado del pilote, su vibrado y su hincas sin problemas. El coeficiente de conductividad térmica del

acero se encuentra entre 50 y 60 W/m·K, lo que lo hace ideal de cara a los ensayos de calentamiento/enfriamiento a los que se va a someter el pilote. Posteriormente este tubo de acero se unirá a las juntas y a los azuches y zunchos del pilote mediante puntos de soldadura para asegurar su correcta alineación y centrado con el eje axial del pilote.

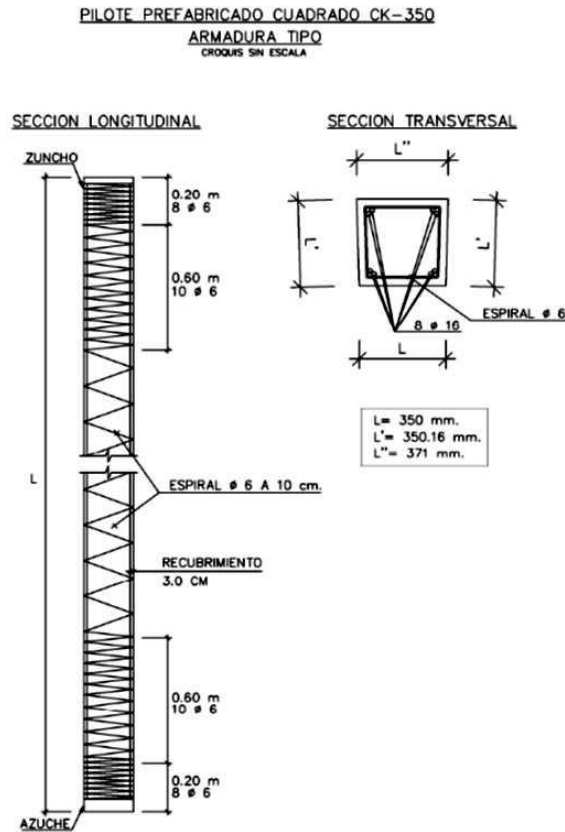


Figura IV-19: Croquis de armado

Dada la longitud del pilote experimental, fue necesario diseñar la inserción de una junta que mantenga su continuidad resistente (Figura IV-20). Esta junta, de tipo machihembrado, está compuesta por dos piezas fabricadas en acero mecanizado que se hormigonan conjuntamente con el tramo correspondiente del pilote y se posicionan con centradores adecuados para garantizar su perfecta alineación. El acoplamiento se realiza por medio de bulones de fácil colocación, que se introducen forzándolos y presionando las juntas entre sí, consiguiendo un empalme que asegura la continuidad del pilote en cuanto a rigidez y resistencia. Cada una de las dos piezas se ha complementado con un cajetín destinado a albergar el cableado de la instrumentación con que cuenta el pilote. Estos cajetines estarán unidos por dos tubos metálicos

huecos de diámetro 35 mm que permitirán el paso del cableado del pilote inferior al superior para su conexión.



Figura IV-20: Juntas empleadas para la fabricación del pilote HCK-350

La junta se ha fabricado cuidadosamente, para asegurar que la energía del golpe se disperse de forma regular por toda el área transversal del pilote, sin sobreesfuerzos localizados. De igual modo se han fabricado los azuches ciegos y los zunchos pasantes (Figura IV-21) correspondientes y adaptados para las dimensiones del pilote HRK-350 y que permiten alojar el tubo que conformará el hueco interior mediante un aro de chapa de 3 mm de espesor.

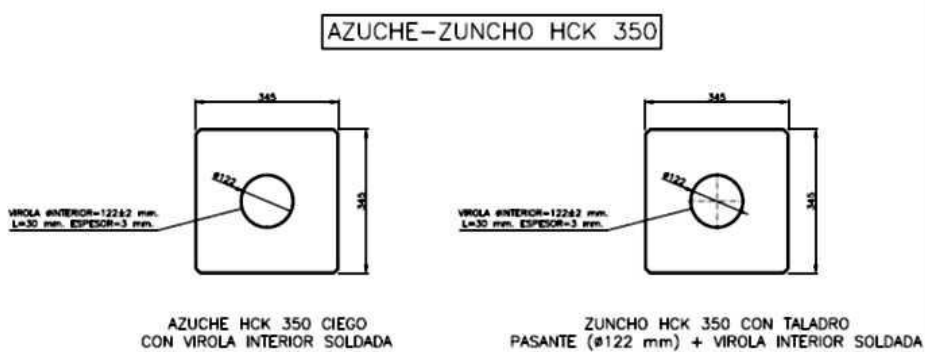


Figura IV-21: Diseño del azuche y zuncho

La Figura IV-22 muestra el azuche ciego en punta para la protección del hormigón durante la hincada y evitar el paso del material de excavación al interior del hueco, así

como el zuncho de refuerzo con hueco pasante receptor de la energía de golpeo en la cabeza.



Figura IV-22: Azuche ciego y zuncho de refuerzo.

Se colocaron además dos cajas auxiliares en cabeza del pilote y para dar salida al cableado hacia el exterior.

Finalmente, se instaló en el interior del pilote una serie de sensores con el objetivo de registrar en tiempo real y poder analizar posteriormente las posibles deformaciones del pilote, tensiones, desplazamientos, giros y temperaturas generadas en el mismo. Para ello, se planteó usar una instrumentación clásica consistente fundamentalmente en extensómetros de cuerda vibrante, galgas extensométricas, célula de carga y sensores de temperatura. Además, se instalaron sensores de fibra óptica para comparar su aplicabilidad, fiabilidad y eficacia con la instrumentación convencional utilizada. En el capítulo II se describe el conjunto de sensores instalados tanto en el interior como en el exterior del pilote.

IV.5 INSTRUMENTACIÓN INTERNA DEL PILOTE

El objetivo final de este ensayo es conocer el comportamiento térmico y mecánico del pilote y el terreno que le rodea, sometido a la acción combinada y simultánea de solicitaciones de tipo térmico y mecánico. Para ello, resulta fundamental instalar una completa instrumentación, tanto en el interior como en el exterior del pilote. El objetivo principal de la instrumentación dispuesta en el interior del pilote es medir la deformación y la temperatura debido a los ciclos mecánicos y térmicos. Para ello, se instrumentó el pilote con un total de 10 bandas extensométricas, 16 sensores de fibra

óptica (monitorizados por un interrogador estático de redes de Bragg) y 14 extensómetros de cuerda vibrante, repartidos en los dos tramos de 8,70 metros de longitud del pilote, según croquis adjunto (Figura IV-23):

Extensómetros de cuerda vibrante	Profundidades	
		1,7
	3,6	14
	5,6	12
	7,6	10,4
	10,4	7,6
	13,2	5,6
	16,1	3,6
		1,7

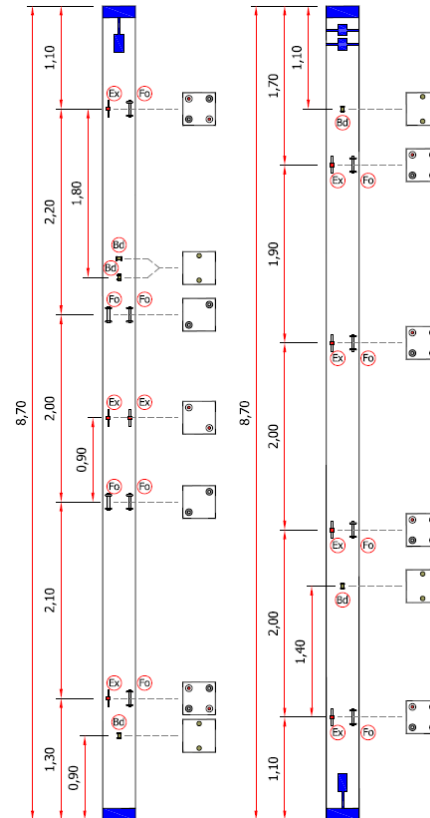


Figura IV-23. Disposición de la instrumentación en el interior del pilote (Ex) extensómetros de cuerda vibrante, (Fo): Sensores de fibra óptica, (Bd): Bandas de deformación o galgas extensométricas

IV.5.1 Extensómetros de cuerda vibrante

Con el fin de obtener las medidas de deformaciones en el interior del pilote se utilizaron 14 extensómetros de cuerda vibrante “VWS 2100” de la marca GEOSENSE, fijados a barras diametralmente opuestas de la armadura cada 2 metros a lo largo de los 17 m de pilote embebidos en el hormigón. Este sensor, de 156 mm de tamaño, consta de un hilo de acero tendido entre 2 soporte de 150 mm de longitud. El rango de deformación susceptible de ser medido por este tipo de sensor es 3000 $\mu\epsilon$, correspondiente a un rango de frecuencia de 850-1550 Hz. Estos extensómetros vienen equipados con un termistor, cuya resistencia es de 3K Ω a 25°C y su rango de medida -55 - 150°C, que mide la temperatura a la que se encuentran en el momento

de registrar la resistencia. De esta forma, la variación de la resistencia en función de la temperatura se expresa según la siguiente ecuación:

Ecuación IV-3

$$T = \frac{1}{A + B(\ln R) + C(\ln R)^3} \cdot -273,2$$

Siendo:

T=Temperatura en °C

LnR: Logaritmo natural de la resistencia del termistor: $R = ae^{B/T0}$

A=1,4051x10⁻³

B=2,369x10⁻⁴

C=1,019x10⁻⁷

Los extensómetros de cuerda vibrante son transductores de tipo tradicional, robustos, de funcionamiento asegurado en ambientes agresivos, inmunes al ruido, de fácil conversión analógico-digital y suficientemente sancionados por la práctica para este tipo de usos, que permitirán verificar el comportamiento y la validez de la tecnología de fibra óptica, novedosa para este tipo de aplicaciones.

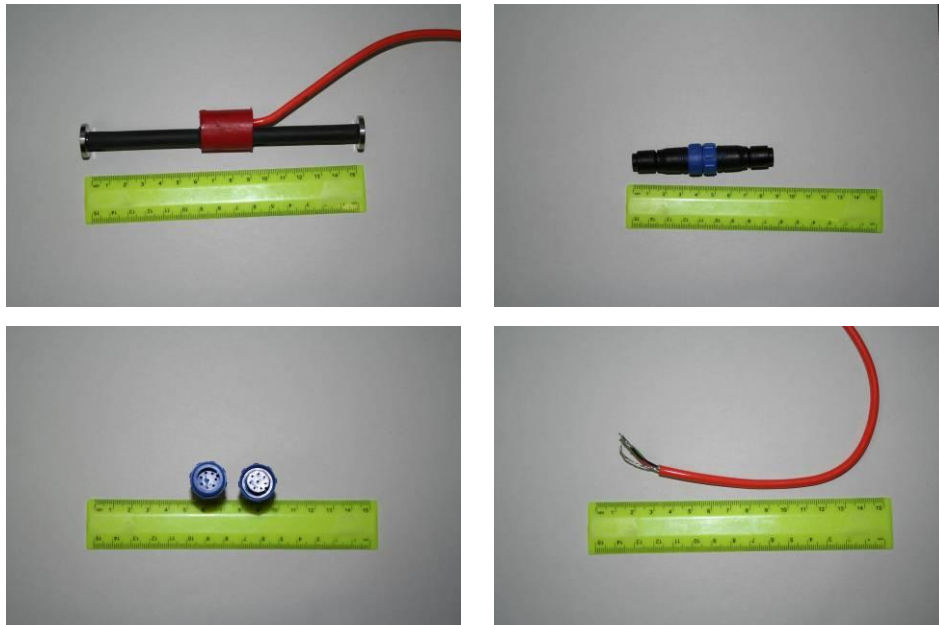


Figura IV-24: Extensómetro de cuerda vibrante, conectores y cableado

IV.5.2 Galgas extensométricas

Se dispusieron bandas extensométricas colocadas a cuatro niveles de profundidad diferentes a lo largo del pilote, de forma transversal para medir la deformación volumétrica del mismo debido a los ciclos de temperatura. Los extensómetros de resistencia o galgas extensométricas son transductores de deformación basados en la variación de la resistencia eléctrica de un hilo conductor formando una rejilla plana al ser sometido a deformación. Estas galgas durante el proceso del hincado se estropearon.

IV.5.3 Sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica son de tipo os3600, de la casa Micron Optics. Este sensor, con un tamaño de 25.4 cm, dispone una segunda red de fibra de Bragg que permite la compensación por temperatura y distingue medidas de deformación y temperatura. Este aspecto resulta especialmente atractivo para el estudio de esta tesis, porque la temperatura induce deformaciones ficticias que son resultado de 2 factores:

- Expansión térmica del sustrato donde la galga está montada
- Modificaciones del índice de refracción en la fibra de Bragg debido a los cambios térmicos

Este tipo de sensor permite obtener medidas de deformación corregida por temperatura, pero no la temperatura absoluta a la que se encuentra el sensor, lo que supone un inconveniente a efectos de este estudio. Para ello, es necesario un calibrado de los sensores, que se realizó en el laboratorio de geotecnia del CEDEX.

El calibrado se realizó en diferentes etapas. En primer lugar, se introdujo la alineación 2 (8 sensores) en un baño termostático de agua (Figura IV-25), que se fue enfriando (con hielo hasta 5°C) y calentando (agua caliente, hasta 60°C) a distintas temperaturas de forma controlada, mientras se medía la T°C del agua con un equipo multiparamétrico YSI ProPlus de medida de pH, potencial redox (Eh), conductividad eléctrica y temperatura. El cable sonda de este equipo dispone de un detector de temperatura interno que no requiere la calibración. El rango del detector se encuentra entre -5 a +70 °C, con una resolución de 0.01 °C, y una precisión de ± 0.15 °C.



Figura IV-25. Sensores dentro de un baño termostático de suelos

Se obtuvieron de esta forma diversos valores de longitud de onda (λ) correspondientes a diferentes temperaturas, con el fin de construir la recta de calibración de cada sensor y obtener los valores de λ_0 y S_t (punto de corte en el origen y pendiente de la recta), mediante la siguiente ecuación:

Ecuación IV-4

$$\lambda(\text{nm}) - \lambda_0(\text{nm}) = S_t(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \cdot [T(^{\circ}\text{C}) - T_0(^{\circ}\text{C})]$$

Donde:

λ es la longitud de onda de cada sensor a una temperatura T , en nm

λ_0 es la longitud de onda inicial de cada sensor a una temperatura T_0 , en nm

S_t es la pendiente de la recta, en $\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Una vez obtenido estos datos se introdujeron en el programa del interrogador MICRON OPTICS, de la siguiente forma:

Ecuación IV-5

$$\frac{(\lambda \cdot 1000) - \lambda_0}{S_t}$$

Una vez realizada estas calibraciones iniciales, en un segundo paso, se sumergieron en un baño a una temperatura estable de 22 °C (controlado con un sensor de temperatura) y se comprobó que todos los sensores medían $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

La Tabla IV-8 y la Tabla IV-9 muestran los datos de calibración de las galgas correspondientes a los sensores de las dos alineaciones.

Tabla IV-8. Datos de calibración alineación 1

T°C		11,4	16,2	20,4	40	51,9	S _t	λ ₀	R ²	λ _{22°}
Sensor	1	1511638	1511747	1511825	1512313	1512617	24,272	1511349	0,99906	1511883
	3	1521827	1521922	1522007	1522526	1522818	24,940	1521522	0,99858	1522071
	5	1531310	1531427	1531521	1532003	1532282	24,081	1531035	0,99991	1531565
	7	1541511	1541625	1541711	1542175	1542449	23,203	1541245	0,99988	1541755
	9	1551549	1551662	1551757	1552238	1552533	24,341	1551267	0,99989	1551802
	11	1561525	1561637	1561727	1562219	1562500	24,258	1561243	0,99974	1561777
	13	1571732	1571851	1571946	1572423	1572700	23,941	1571461	0,99993	1571987
	15	1581261	1581381	1581477	1581943	1582214	23,525	1580997	0,99990	1581515

Tabla IV-9. Datos de calibración alineación 2

T°C		11,4	16,2	20,4	40	51,9	S _t	λ ₀	R ²	λ _{22°}
Sensor	1	1511638	1511747	1511825	1512313	1512617	24,272	1511349	0,99906	1511883
	3	1521827	1521922	1522007	1522526	1522818	24,940	1521522	0,99858	1522071
	5	1531310	1531427	1531521	1532003	1532282	24,081	1531035	0,99991	1531565
	7	1541511	1541625	1541711	1542175	1542449	23,203	1541245	0,99988	1541755
	9	1551549	1551662	1551757	1552238	1552533	24,341	1551267	0,99989	1551802
	11	1561525	1561637	1561727	1562219	1562500	24,258	1561243	0,99974	1561777
	13	1571732	1571851	1571946	1572423	1572700	23,941	1571461	0,99993	1571987
	15	1581261	1581381	1581477	1581943	1582214	23,525	1580997	0,99990	1581515

La información de calibración de los sensores (Figura IV-26) que facilita el fabricante contiene la longitud de onda de referencia tomada a 22 °C (λ₂₂) y el valor de S_t.

Se observa que el valor de S_t del fabricante es siempre 23,8. Por el contrario, la calibración de laboratorio ha demostrado que este parámetro oscila entre 22 y 25 pm/°C. Por otro lado, ningún valor de λ₂₂ obtenido en la calibración de laboratorio coincide con el valor ofrecido por el fabricante. Una pequeña variación de estos parámetros puede provocar variaciones de la temperatura absoluta medida muy considerables, lo que refuerza la importancia del calibrado previo llevado a cabo.

MICRON OPTICS Sensor Information Sheet

os3600 | Long Gage Strain Sensor

Part # os3600-025-1562/1566- 1xx- 1yy-E
 Serial # C157686
 Nominal Wavelength, $\lambda_{0,Temp}$ (nm) @22°C 1561.964
 Nominal Wavelength, $\lambda_{0,Strain}$ (nm) @22°C 1566.338
 Certified by: *JP*

Variable	Description	Value	Units
$F_{G, Strain}$	Gage Factor	0.777@22°C	-
C_1	Gage Constant 1	0.796@22°C	-
C_2	Gage Constant 2	10.1	$\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$
CTE_S	CTE of Test Specimen	User Defined	$\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$
$\Delta\lambda_{Strain}$	Wavelength Shift (Strain)	Interrogated	nm
$\Delta\lambda_{Temp}$	Wavelength Shift (Temp)	Interrogated	nm
S_T	Temperature Sensitivity	-23.8	pm°C

Strain (mechanically induced $\mu\text{m/m}$):
 $\epsilon = [(\Delta\lambda/\lambda_0)(1 \times 10^6)]/F_{G,Strain} - \epsilon_{TO}$
 Thermal Output (thermally induced apparent strain, $\mu\text{m/m}$):
 $\epsilon_{TO} = [(\Delta\lambda/\lambda_0)(1 \times 10^6)]/C_1 + (CTE_S - C_2)(1 \times 10^3)(\Delta\lambda_{Temp}/S_T)$

Figura IV-26. Cuadro resumen tipo de calibración de los sensores os3600

Se adquirieron 16 sensores de redes de Bragg, distribuidos en 2 sistemas en serie (arrays), colocados cada 2 metros aproximadamente a lo largo de dos barras de la armadura diametralmente opuestas. Cada sistema en serie consta de 8 sensores unidos mediante un cable continuo. La ventaja principal que muestran estos sensores es la posibilidad de medir deformación en diversos puntos usando un solo cable. La resolución de estos sensores es del orden de 1 μm en deformación y 0.1 $^\circ\text{C}$ en temperatura.

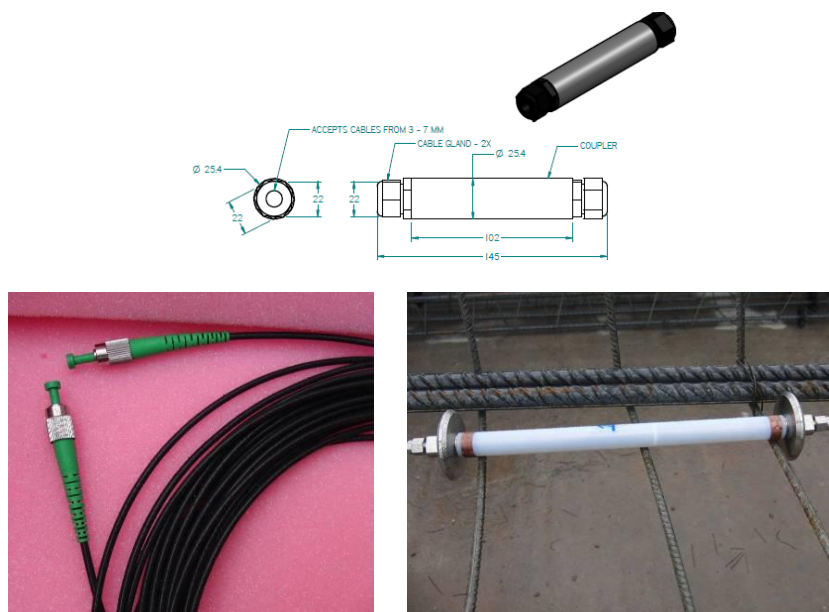


Figura IV-27: Sensor de fibra óptica embebible en hormigón con discos de montaje, conector y cápsula de protección.

IV.5.4 Colocación de los sensores en el interior del pilote

La colocación de la instrumentación interna se llevó a cabo sobre las mismas pistas de hormigonado del pilote. Los sensores de fibra óptica (16) y los extensómetros de cuerda vibrante (14) se fueron situando sobre la armadura longitudinal del pilote uniéndolos mediante bridas. Se dispusieron colocando cada línea de sensores de cada tipo de forma diametralmente opuesta sobre la sección teórica transversal.



Figura IV-28. Instrumentación dispuesta en el pilote

Las líneas de cableado van desde el azuche del pilote hasta la junta en el tramo inferior y desde el zuncho hacia la junta en el tramo superior. Los extensómetros de cuerda vibrante y bandas extensométricas están dispuestos en paralelo, lo que implica que cada sensor cuenta con su propia línea de cableado individual. Por el contrario, los sensores de fibra óptica se colocan en serie uno a continuación del otro.

Finalmente, tanto las líneas de cableado del pilote inferior como las del superior convergen en sus respectivos cajetines, donde se deja la longitud de conexión necesaria alojada en cada uno de ellos (Figura IV-29 y Figura IV-30)

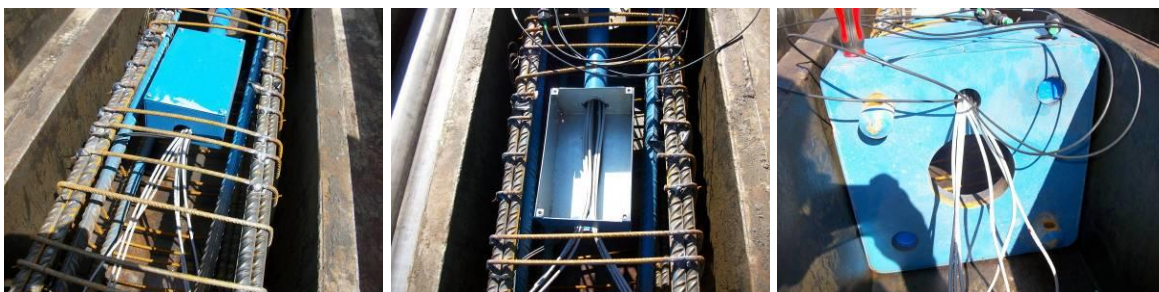


Figura IV-29: Llegada del cableado a los cajetines de las juntas y salida por el frontal de la misma

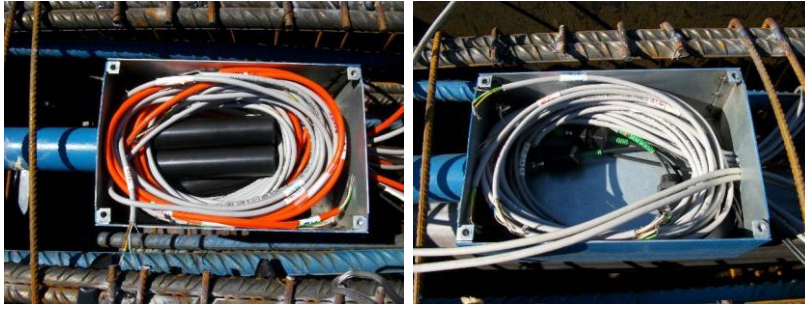


Figura IV-30: Izda.) Cableado alojado en cajetín de junta inferior. Dcha.) Cableado alojado en cajetín de junta superior

En la parte superior del pilote se disponen dos cajetines auxiliares que permiten la salida al exterior de toda la instrumentación y su conexión con los equipos de medida (Figura IV-31). Es en esta zona donde se concentra la mayor cantidad de cableado y donde se disminuye significativamente la sección de hormigón del pilote, por lo que la colocación de la instrumentación y posterior vibrado del hormigón se debe realizar con especial cuidado.

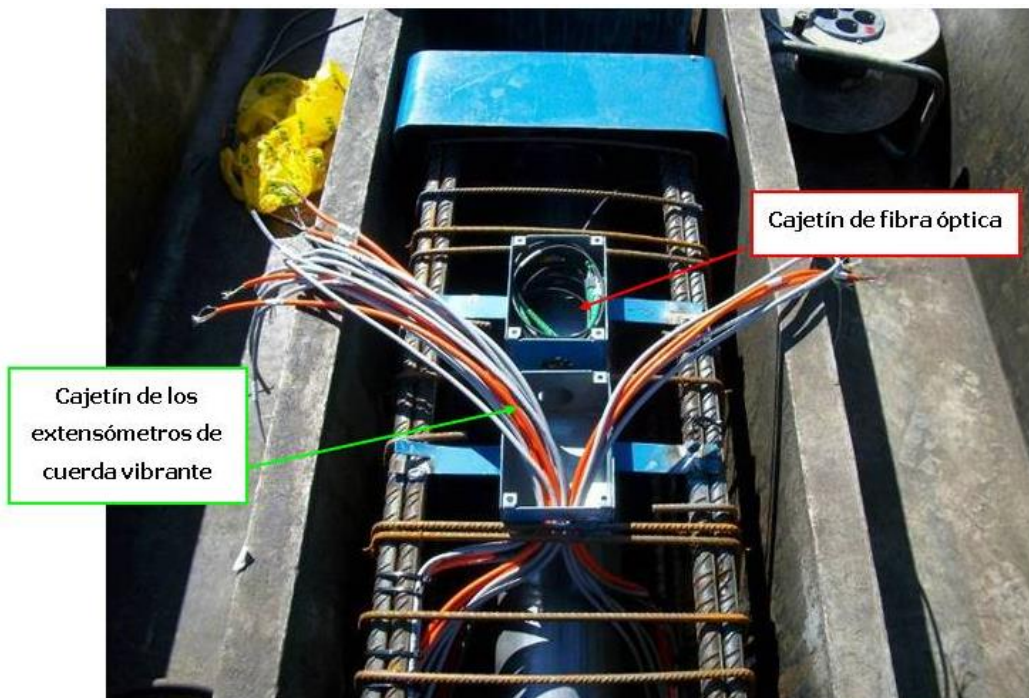


Figura IV-31: Cableado en los cajetines superiores de salida

IV.6 HINCADO DEL PILOTE

El día 26 de junio de 2012 se trasladaron desde la factoría de pilotes de GRK en Algete hasta el emplazamiento elegido, situado en la Universidad de Valencia, las dos piezas de pilote junto con las instalaciones y material auxiliar necesario para el hincado del pilote (casetas de obra, analizador dinámico de hinca, grupo electrógeno, contenedor de obra con herramienta y repuestos, depósito de gasoil, etc).



La hinca se ejecutó el día 27 de junio con una máquina hidráulica Junttan PM-20, armado con un martillo JUNTTAN HKK7AS con maza de 7 t, que consta de una torre guía montada sobre un carro de orugas (Figura IV-32).

Figura IV-32: Junttan PM-20 con martillo de 7 t

Por dicha torre se desliza la maza con caída libre y altura regulable con un peso de 70 kN que proporciona la energía de hinca; el accionamiento de esta maza es hidráulico lo que permite un perfecto control de la energía de hinca. Este modelo permite alturas de caída variables hasta un máximo de 1,20 m, con una eficiencia (energía real/energía teórica) del 95 %.

Las siguientes figuras permiten ver el proceso de la hinca en sus diferentes pasos: izado del pilote (Figura IV-33), presentación y nivelado (Figura IV-34), proceso de hinca (Figura IV-35) y finalización de la hinca del primer tramo (Figura IV-36).



Figura IV-33: Izado del pilote,



Figura IV-34: Presentación y nivelado



Figura IV-35: Proceso de hinca



Figura IV-36: Hinca del primer tramo finalizada

Tras la hinca del primer tramo, se procedió a realizar las conexiones de la instrumentación (Figura IV-37). En total se conectan 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 al cableado de los extensómetros de cuerda vibrante inferiores (6 conectores) para permitir su salida por la cabeza del pilote (Figura IV-38). Así mismo, se empalman los tramos superiores e inferiores del cableado correspondiente a las bandas extensométricas (6 empalmes) instaladas en el pilote. A continuación, se describe este proceso por fases (Figura IV-37 a Figura IV-44).

En primer lugar, se extrae todo el cableado del cajetín inferior y se preparan sus extremos para las conexiones (limpieza, saneado, soldado, etc.).



Figura IV-37: Apertura del cajetín inferior del pilote y extracción del cableado de espera procedente del tramo inferior.



Figura IV-38: Conectores de extensómetros y fibra óptica. Manguito protector para conexión de fibra óptica

A continuación, se iza el segundo tramo hasta presentarlo al primero y se mantiene en posición para permitir la apertura de la caja del segundo tramo y extraer todo el cableado de espera correspondiente al tramo superior (Figura IV-39).



Figura IV-39: Izado del segundo tramo de pilote y colocación en posición para la realización de las conexiones



CONEXIONES LISTAS

Figura IV-40: Apertura del cajetín superior y 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 la entrada de material o agua del terreno y evitar la aparición de tapones y adherencias durante el proceso de hincado que resta (Figura IV-41).



Figura IV-41: Izda. y centro. Los cajetines de las juntas donde se alojan todas las conexiones se cierran y se protegen con mortero de cemento. A la dcha. colocación de los pasadores de unión

Tras colocar los pasadores con ayuda de una maza se continúa con el proceso de hincado (Figura IV-42).



Figura IV-42: Finalización de la hinca



Figura IV-43: Apertura de los cajetines superiores y extracción del cableado

Finalmente se comprueba que el pilote llega 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 (Figura IV-43), que se abrieron para realizar unas primeras comprobaciones sobre la instrumentación (Figura IV-44). Se comprueba que tanto la fibra óptica como los extensómetros han resistido los impactos durante el hincado del pilote.



Figura IV-44: Izda. Comprobación de la instrumentación tradicional. Dcha. Interrogador y PC para comprobación de la fibra óptica

IV.7 PRUEBA DE CARGA DINÁMICA

La prueba de carga dinámica permite hacer un seguimiento durante el proceso de hincado del pilote y determinar la capacidad portante final del mismo, mediante el uso de un Analizador Electrónico de Hincado de Pilotes (P.D.A., "Pile Driving Analyzer"), que proporciona información de la integridad física del pilote y características de la hincado, en términos de tensiones originadas en el pilote y energía suministrada por el martillo.

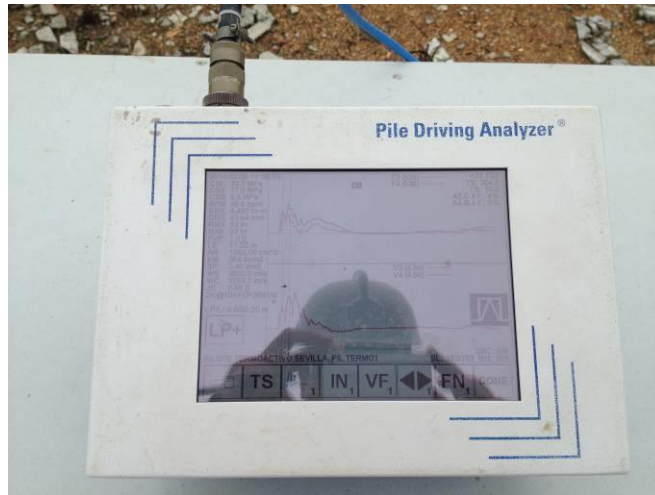


Figura IV-45: Analizador Electrónico de Hinca de Pilotes (Árcos Álvarez y De Juan García 2007)

Para poder realizar este ensayo, es necesario instalar previamente una serie de sensores, acelerómetros y extensómetros, que miden durante la hinca las tensiones y compresiones máximas provocadas por los impactos del martillo, además de registrar las distintas capacidades portantes movilizadas durante las pruebas (Figura IV-46).



Figura IV-46: Instalación en el pilote de acelerómetros y extensómetros para realizar el ensayo P.D.A.

En el caso que se estudia, se llevó a cabo una prueba dinámica de carga continua durante la hinca de la segunda pieza del pilote y dos pruebas en rehinca, transcurridas varias horas desde el final de la hinca. El equipo utilizado ha sido un P.D.A. (Pile Driving Analyzer), modelo P.A.X., de la firma Pile Dynamics Inc. (P.D.I.) - Cleveland-Ohio- USA. Las pruebas dinámicas de carga se ejecutaron de acuerdo con el método

desarrollado por la CASE WESTERN UNIVERSITY U.S.A. (Goble & Hussein,1994), ajustándose al procedimiento descrito en la normativa ASTM-D 4945-00. “Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles” (Figura IV-47).



Figura IV-47: Realización del ensayo de carga dinámica (P.D.A.)

Estos datos son analizados “in situ” mediante el método CASE, o posteriormente procesados mediante el método CAPWAP:

- **Método CASE**, (procesamiento “in situ”, durante la ejecución de las pruebas). Se ha utilizado durante las pruebas un factor de amortiguamiento $J_c = 0,5$, adecuado para el tipo de terreno existente.
- **Método CAPWAP**, (procesamiento posterior, en gabinete). Se trata de un código de modelización del sistema suelo-pilote basado en la ecuación de onda, que simula una prueba estática de carga obteniendo su curva carga-asiento y diferenciando las resistencias movilizadas en punta del pilote y la adherencia a lo largo del fuste del mismo. Con cada análisis CAPWAP se incluyen cuatro diagramas:
 - Convergencia entre la curva medida (Msd) y la curva calculada mediante la modelización matemática del pilote (Cpt).
 - Curvas de fuerza medida (For Msd) y la curva de velocidad medida (Vel Msd) por medio de las parejas de sensores.
 - Curvas carga-asiento que se obtendrían en una prueba de carga estática, simulada a partir de los parámetros obtenidos del análisis CAPWAP.

- Distribución de carga a lo largo del pilote, en forma incremental y acumulada. La cabeza del pilote se toma en el origen de abscisas.

IV.7.1 Método CASE

El método CASE, desarrollado por la Case Western Reserve University (Ohio), se basa en la teoría de la propagación de una onda de choque en un cilindro delgado. Las señales de fuerza y velocidad registradas por los extensómetros y acelerómetros son usadas para calcular la onda de tensión transmitida al pilote y reflejada por éste; permitiendo determinar la capacidad de carga, esfuerzos de compresión y tensión, evaluación de la integridad y energía transmitida por el impacto a lo largo del pilote durante el proceso de hinca. La forma de esta onda reflejada estará condicionada por la resistencia que opone el terreno al pilote, lo que permite determinar la carga admisible del pilote (Goble y Hussein 1994)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos, a través del método CASE, en el pilote ensayado. La Figura IV-48 muestra las compresiones y tracciones registrados por los extensómetros durante la hinca del pilote. De acuerdo con este gráfico, mientras las compresiones se han mantenido constantes en torno a los 16 MPa durante toda la hinca, los valores de tracción máxima se mantienen por debajo de 1 MPa a lo largo del pilote hasta los 14,30 m hincados, para luego subir hasta alcanzar un máximo de los 2,15 MPa en el último tramo.

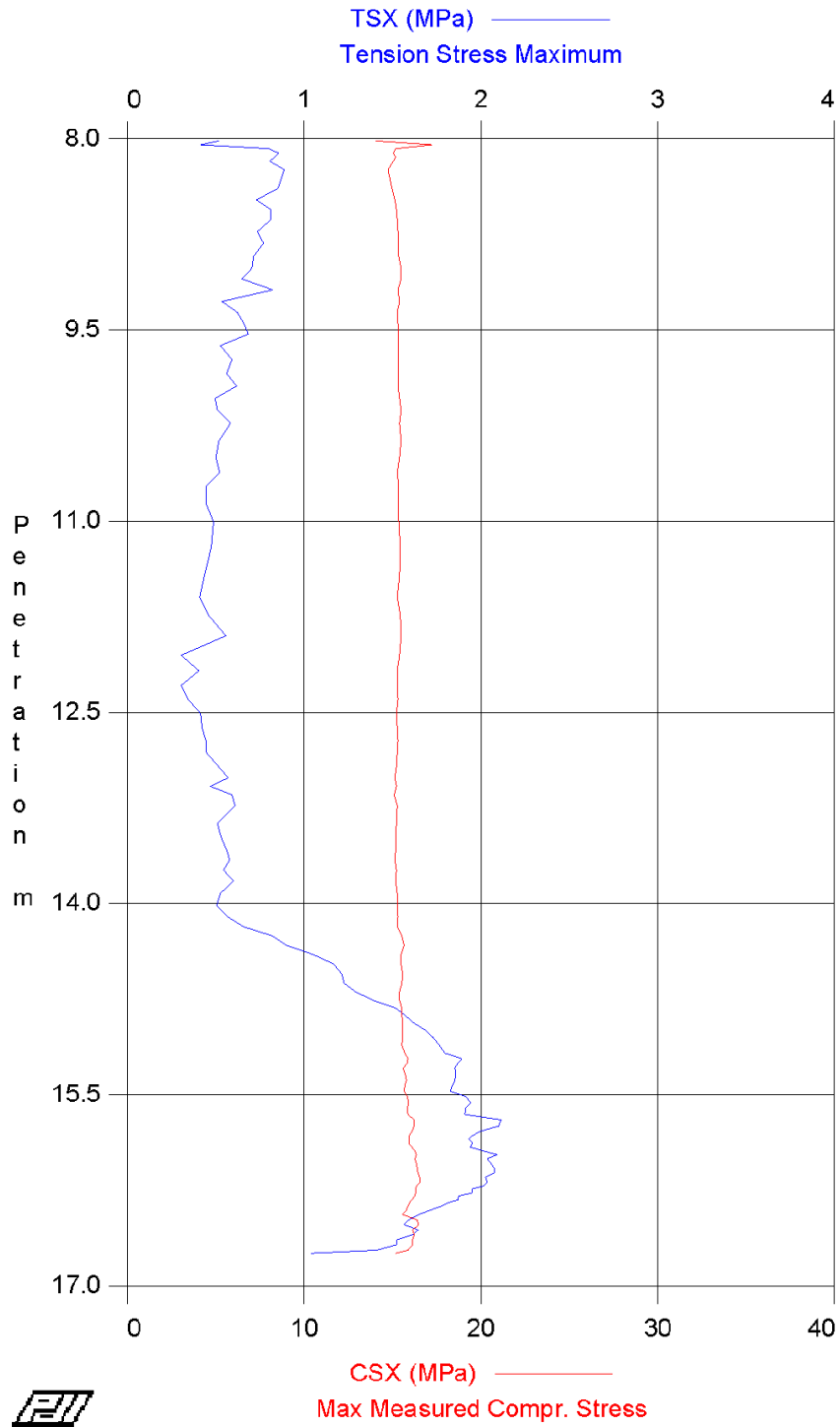


Figura IV-48: Compresiones (rojo) y tracciones (azul) medidas durante la prueba

En cuanto a la energía transferida al pilote (Figura IV-49), los valores se han mantenido constantes en torno a las 2 t·m. Se muestran también en la misma gráfica los valores de desplazamiento teórico calculados a partir de las curvas registradas.

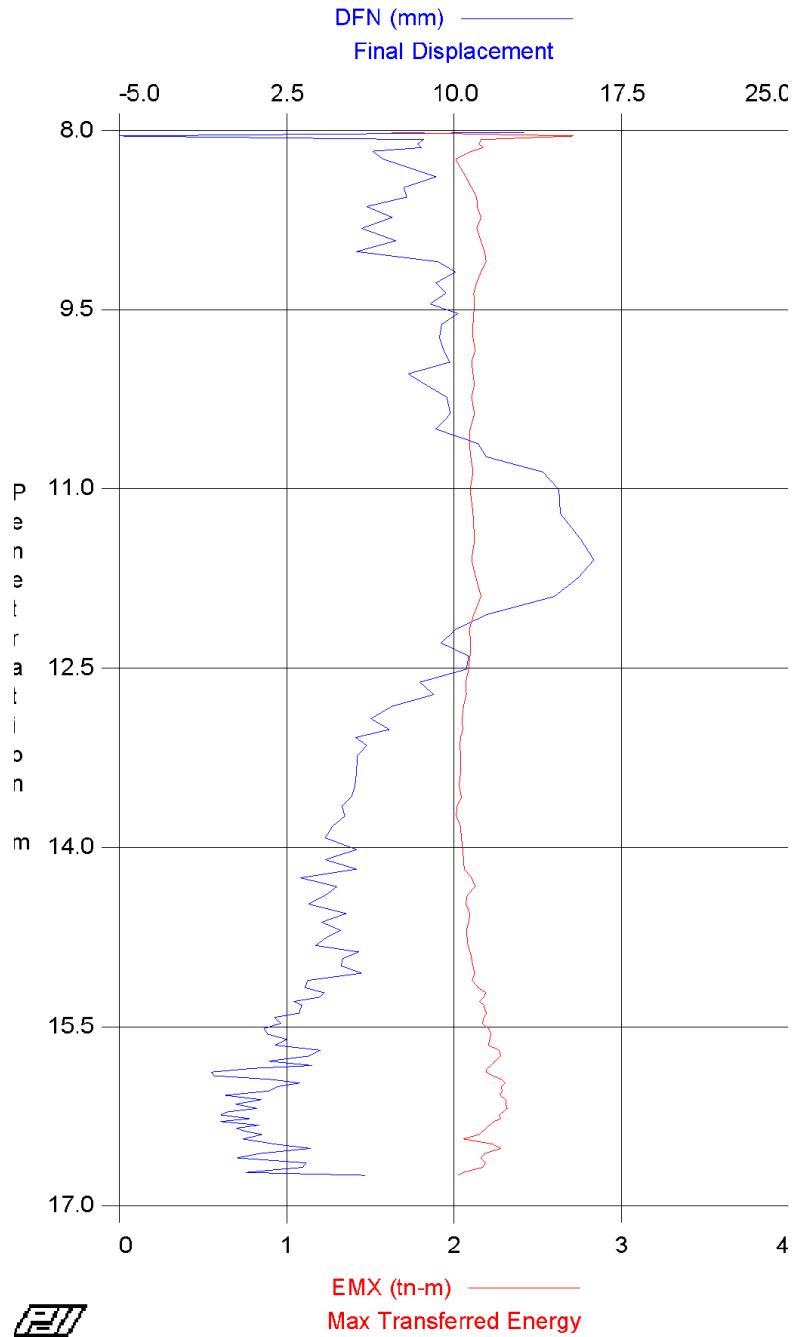


Figura IV-49: Energía transferida al pilote (rojo) y desplazamiento teórico final (azul)

Se adjuntan las compresiones calculadas en la punta del pilote y la capacidad portante estática estimada a partir de la aplicación del método CASE con un factor de amortiguamiento de 0,5. Como se puede observar (Figura IV-50), el valor máximo se alcanza a los 16,40 m, donde la prueba de penetración dinámica DPSH dio rechazo. Sin embargo, por debajo, la capacidad portante disminuye.

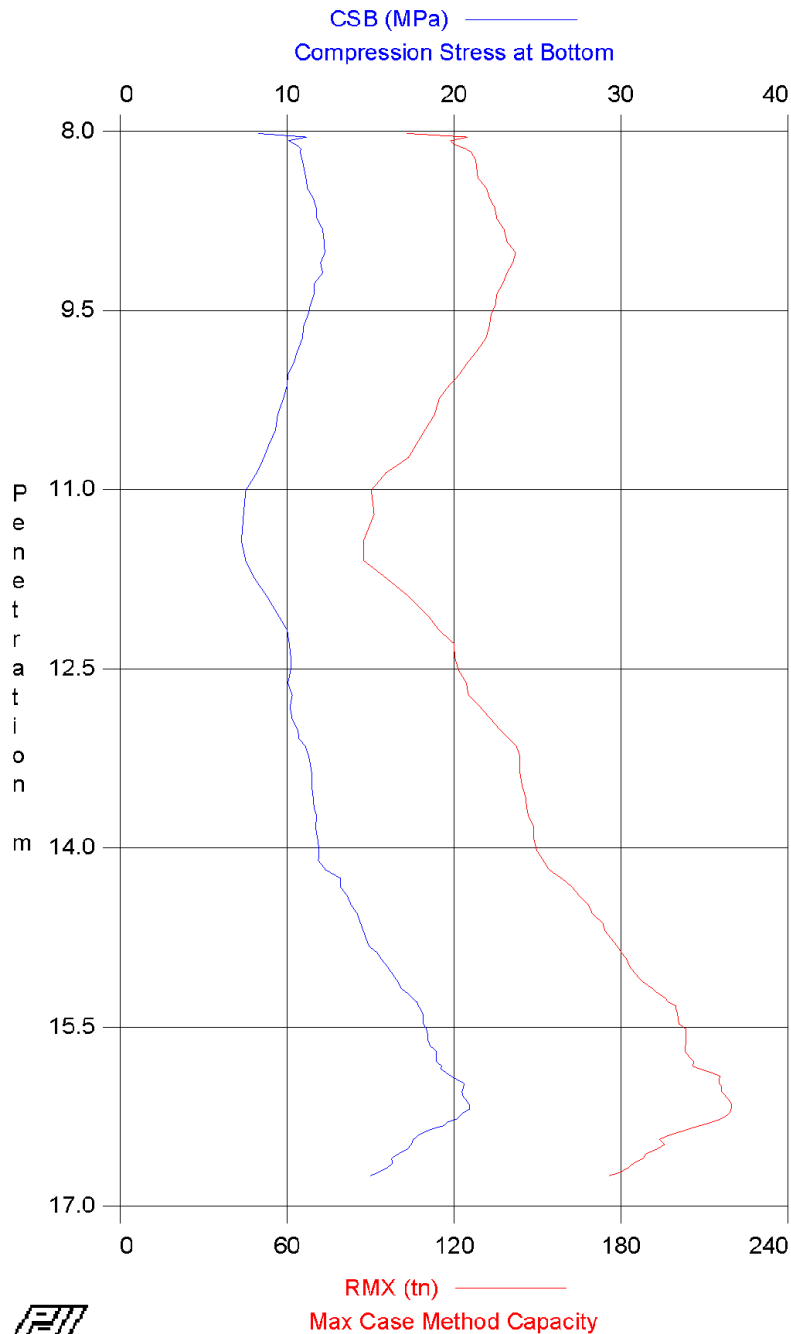


Figura IV-50: Compresión en la punta del pilote (azul) y capacidad portante estática estimada (rojo)

IV.7.2 *Análisis CAPWAP*

El programa CAPWAP se basa en un modelo matemático que discretiza el sistema maza-pilote-suelo en segmentos continuos y uniformes (elementos finitos). Mediante un proceso de cálculo iterativo se obtienen los parámetros del suelo, resistencia por punta del pilote, distribución de la resistencia por fuste, y la correlación entre carga-asiento, simulando una prueba de carga estática.

El programa toma como entrada los datos de fuerza y velocidad obtenidos con el analizador de hincado del pilote (PDA). Es esencial para post- proceso de datos PDA con CAPWAP para analizar los resultados del hincado.

CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) es un procedimiento analítico riguroso que fue desarrollado para calcular las fuerzas resistentes del suelo y su distribución a partir de la fuerza aplicada en cabeza y la velocidad, registrada a través de la PDA. El pilote es representado como una modelo de transmisión de onda continua. La reacción del suelo se divide en dos componentes: Estático (elasto-plástico) y dinámico. El procedimiento de análisis consiste en la concordancia de señales de la fuerza medida en la cabeza del pilote y la velocidad, tomando una como dato de entrada y la otra como condición de contorno, manipulando el modelo de suelo a lo largo del fuste y bajo la punta. Los resultados que se obtienen incluyen: distribución de la resistencia movilizada por fuste, resistencia movilizada por punta, carga en cabeza y punta versus desplazamiento y la curva de carga-asiento (cabeza y punta del pilote). Con cada análisis CAPWAP se incluyen cuatro diagramas (Figura IV-51):

- La convergencia entre la curva medida, fuerza-velocidad (Msd) y la curva calculada mediante la modelización matemática del pilote (Cpt).
- La curva de fuerza medida (For Msd) y la curva de velocidad medida (Vel Msd) por medio de las parejas de sensores.
- Curvas carga-asiento que se obtendrían en una prueba de carga estática, simulada a partir de los parámetros obtenidos del análisis CAPWAP.
- Un gráfico de la distribución de carga. La cabeza del pilote se toma en el origen de abscisas. El diagrama muestra los esfuerzos en el pilote en forma de incrementos y de forma acumulativa (parte superior e inferior del eje de abscisas, respectivamente).

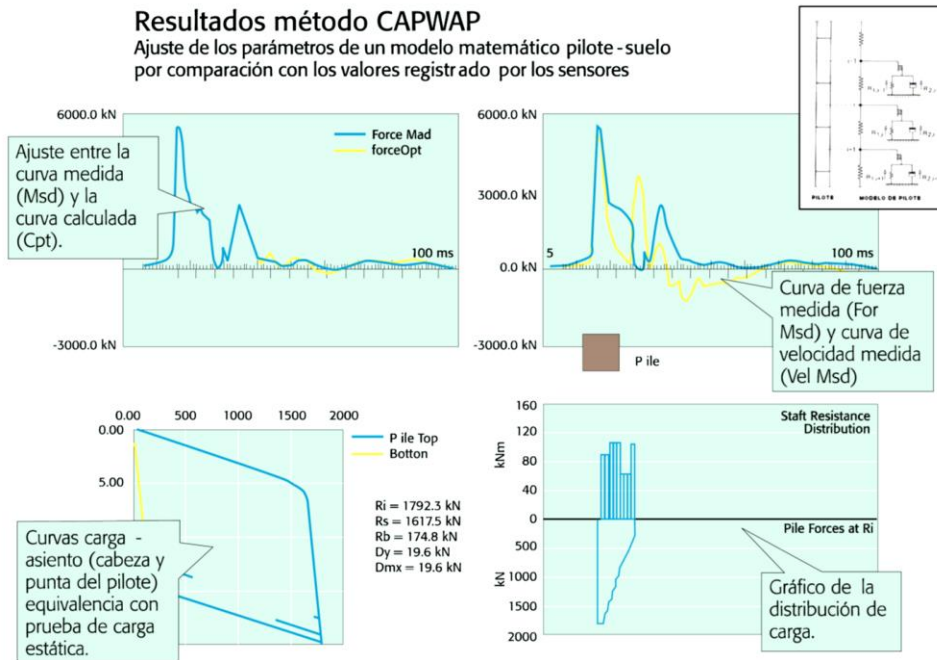


Figura IV-51: Resultados método CAPWAP (Árcos Álvarez y De Juan García 2007).

Los resultados obtenidos en el pilote de ensayo se muestran en la Figura IV-52.

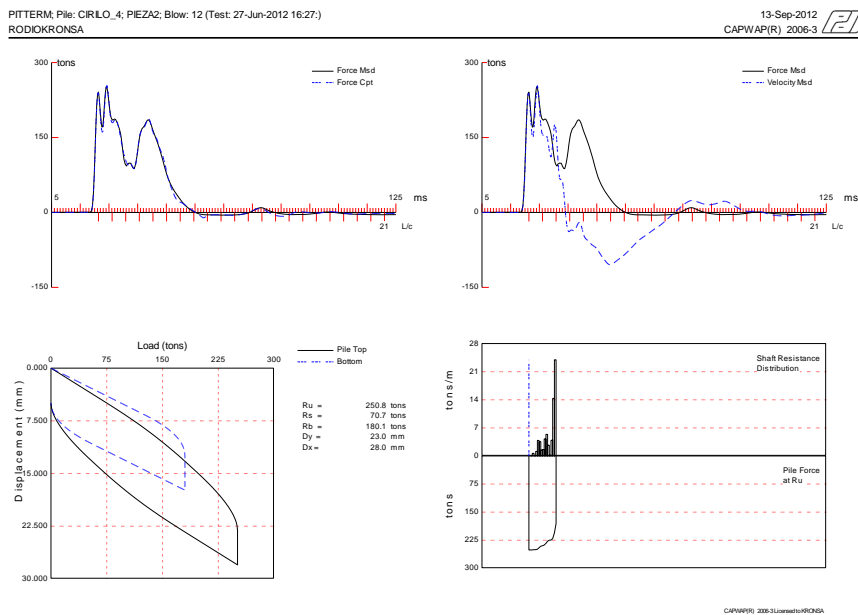


Figura IV-52: Resultados a través del método CAPWAP del pilote ensayado

La prueba realizada aproximadamente tres horas después del final de la hinca permite realizar la simulación de una prueba de carga estática que se muestra en la Figura IV-53, donde se observa que la carga máxima movilizada ha sido de 250,8 t de los cuales 70,7 t se desarrollan en el fuste y 180,1 t en la punta.

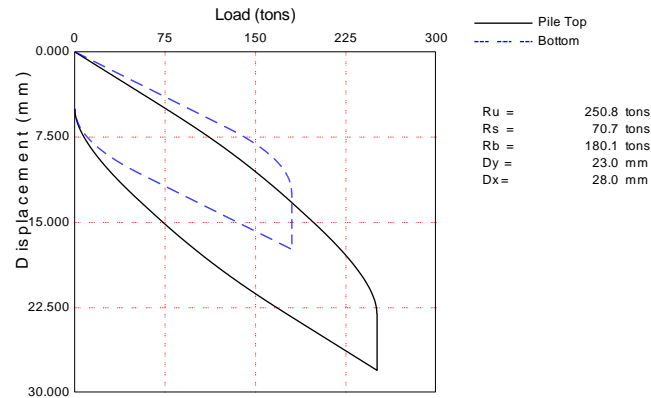


Figura IV-53: Simulación de prueba de carga estática tres horas después de la hinca

Se repite el mismo análisis diecinueve horas después del final de la hinca, permitiendo una simulación de prueba de carga estática donde la capacidad movilizada total es de 237 t, de los que 86,2 corresponden al fuste y 150,8 t a la punta. En esta prueba la resistencia movilizada fue inferior, como corresponde a un golpe de menor energía que no desarrolló completamente la resistencia en punta (Figura IV-54).

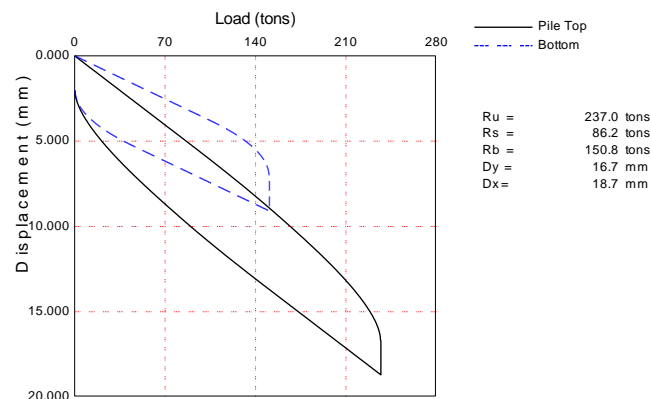


Figura IV-54: Simulación de prueba de carga estática diecinueve horas después de la hinca

A partir de la información suministrada por los ensayos, es posible deducir la siguiente información:

- Durante la hincada, las compresiones y tracciones se situaron dentro de los márgenes admisibles por el pilote.
- En la fecha de realización de la prueba, la capacidad portante del pilote se concentra en el fuste del último par de metros y en la punta. Es previsible que la resistencia en los estratos superiores más arcillosos aumente con el tiempo, incrementando levemente la capacidad portante final del elemento.
- A partir de la capacidad portante movilizada en la prueba se obtiene un coeficiente de seguridad superior a 2 respecto de la carga de servicio del ensayo de caracterización termo-mecánica.

IV.8 ACTIVACIÓN TÉRMICA DEL PILOTE

Una vez hincado el pilote, se procede a su activación térmica. Este paso consiste en instalar en su interior la sonda geotérmica que convertirá al pilote en un elemento de intercambio de calor con el terreno. En este caso, se decidió instalar una sonda en doble U, de 25 mm de diámetro nominal y 50 metros de longitud. Se describe el procedimiento a continuación.

IV.8.1 *Introducción de la sonda*

Tras comprobar que la sonda y elementos auxiliares están en perfecto estado y cumplen con los requisitos descritos, se procede a su introducción dentro del pilote. Es fundamental descender la sonda lentamente y con las debidas precauciones con el fin de 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 IV-55).



Figura IV-55: Introducción de la sonda en el interior del pilote

Una vez introducida la sonda geotérmica, se corta la tubería sobrante y mediante electrosoldadura se añaden los codos y se une a la tubería horizontal (Figura IV-56).



Figura IV-56: Conexión mediante codos a la tubería horizontal

IV.8.2 Prueba de estanqueidad

Finalmente, se realiza una prueba de estanqueidad para garantizar la ausencia de fallos o micro roturas que pudieran provocar fugas durante todo el periodo de experimentación posterior en el pilote. La prueba consiste en llenar las tuberías de agua a una presión de 5 bar durante 2h. Después de dicho tiempo se comprueba que el descenso de la presión es inferior al 10%.

IV.8.3 Inyección del mortero de alta conductividad térmica

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

- **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, **atendiendo a su puesta en obra** se fijaron requerimientos respecto a su densidad, viscosidad, tiempo abierto, calor de hidratación, retracción, decantación o agua libre, tiempo de fraguado y tamaño máximo de partícula, entre otros.

- Por otro lado, **desde un punto de vista geotécnico**, se consideró necesario que el comportamiento mecánico del mortero una vez fraguado presente unas resistencias mecánicas y un comportamiento tenso-deformacional similar al del cuerpo del pilote para evitar comportamientos diferenciales.

Una vez definidos los requisitos que debía cumplir este mortero, se definió su dosificación. En la Tabla IV-10 se muestran los parámetros de dosificación del mortero resultante (FCK5025), así como sus propiedades características, como densidad, conductividad térmica, resistencia a compresión a 2 y 28 días y resistencia a flexión.

Tabla IV-10: Características del mortero FCK 5025

Agua de amasado por saco	4,15 Litros
Dosificación por m ³	293,3 Litros 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

Se procedió a mezclar en batidora los ingredientes siguiendo las instrucciones y dosificación indicadas por el fabricante y poniendo especial atención en la adición de los componentes de forma gradual de forma que se favorezca la adecuada mezcla de los mismos (Figura IV-57).



Figura IV-57. Mortero durante proceso de amasado

Una vez fabricado el mortero, se introdujo en el interior de la tubería metálica del 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 polietileno (PE), evitando así la formación de huecos sin rellenar en el interior del pilote. La inyección se detuvo cuando la lechada desbordó la cabeza del pilote (Figura IV-58).



Figura IV-58: Inyección del mortero en el interior del pilote

IV.8.4 Prueba de presión final

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.

IV.9 MONTAJE DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGA MECÁNICA

La simulación de las cargas mecánicas estáticas que pudiera tener un pilote de cimentación de una estructura de edificación cualquiera requiere de la aplicación de una carga constante que se puede fijar en un valor promedio de 100 t. Para simular las sollicitaciones mecánicas se ha empleado un bastidor metálico en forma de “T” anclado al terreno por tres puntos que actúa a modo de elemento de reacción. Se describe a continuación el sistema y el proceso de instalación del mismo sobre el pilote estudiado.

IV.9.1 Elementos del sistema de aplicación de carga mecánica

Los elementos que conforman el sistema de aplicación de la carga mecánica son:

Bastidor metálico. La misión del bastidor es la de transmitir las cargas desde los anclajes al pilote termoactivo. Este bastidor (Figura IV-59) fue diseñado para ser capaz de asumir cargas superiores a las del trabajo del pilote (100 t) y su comportamiento ha sido comprobado y aprobado en diversos ensayos de carga realizados por GRK.



Figura IV-59: Bastidor de reacción junto con sus patas

Castillete metálico o “caballete” actúa a modo de sufridera (Figura IV-60), repartiendo la carga proveniente del gato hidráulico sobre la cabeza del pilote y permitiendo, al mismo tiempo, la salida de las sondas geotérmicas por el hueco central del mismo. Está conformada por placas de acero de espesor mínimo de 25 mm unidas mediante cordón de soldadura continuo.



Figura IV-60: Castillete o sufridera

Gato hidráulico que, colocado sobre una placa de acero en la cabeza del pilote, permite aplicar la carga estática actuando contra el bastidor de reacción anclado. Para la aplicación de la carga se usó una bomba hidráulica automática complementada por una bomba manual. Las presiones internas del gato fueron medidas usando un manómetro digital calibrado. Sus características principales son:

- Máxima Fuerza: 150 t
- Máxima presión de aceite: 700 bar
- Máximo recorrido: 152,4 mm

Célula de carga, para controlar la carga real que llega a la cabeza del pilote.

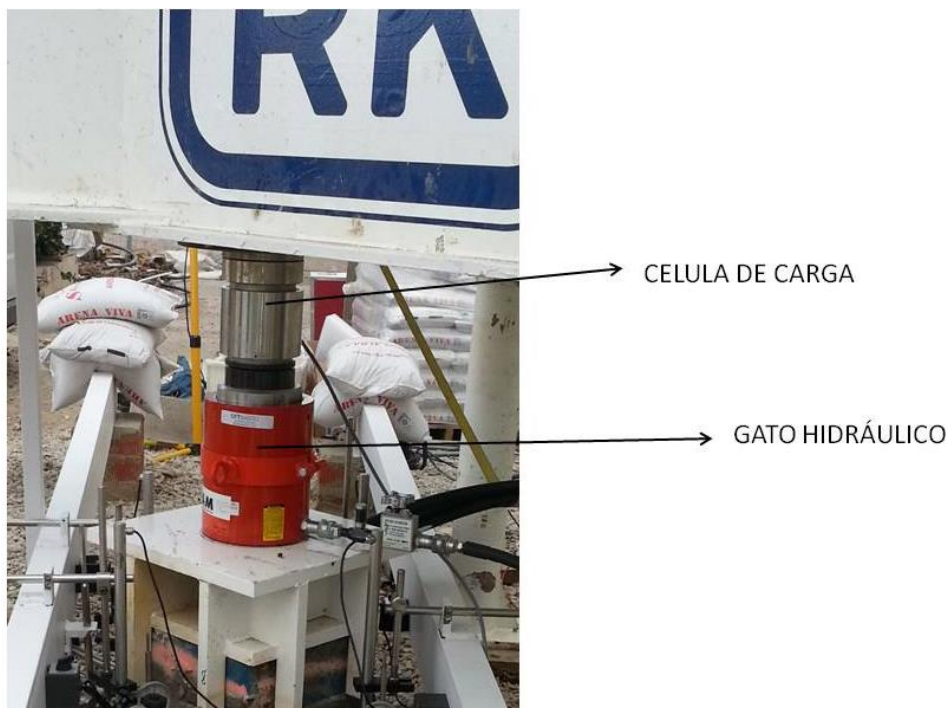


Figura IV-61. Célula de carga y gato hidráulico

IV.9.2 Ejecución de los anclajes

Como se ha comentado anteriormente, las sollicitaciones mecánicas sobre el pilote se han simulado mediante un gato hidráulico actuando contra un bastidor metálico en forma de "T" anclado al terreno por tres puntos que actúa a modo de elemento de reacción. Este anclaje al terreno se ha realizado mediante 3 anclajes activos de barra tipo "Gewi" que trabajan a tracción. Las principales características de estos anclajes se resumen en la Tabla IV-11.

Tabla IV-11: Características de los anclajes

Límite elástico del acero	500 Mpa
Diámetro	40 mm
Inclinación	5°
Diámetro de perforación	140 mm
Cemento	Cem II 32,5 N

En primer lugar, fue necesario realizar un replanteo de los anclajes en el terreno según croquis que se muestra en la Figura IV-62.

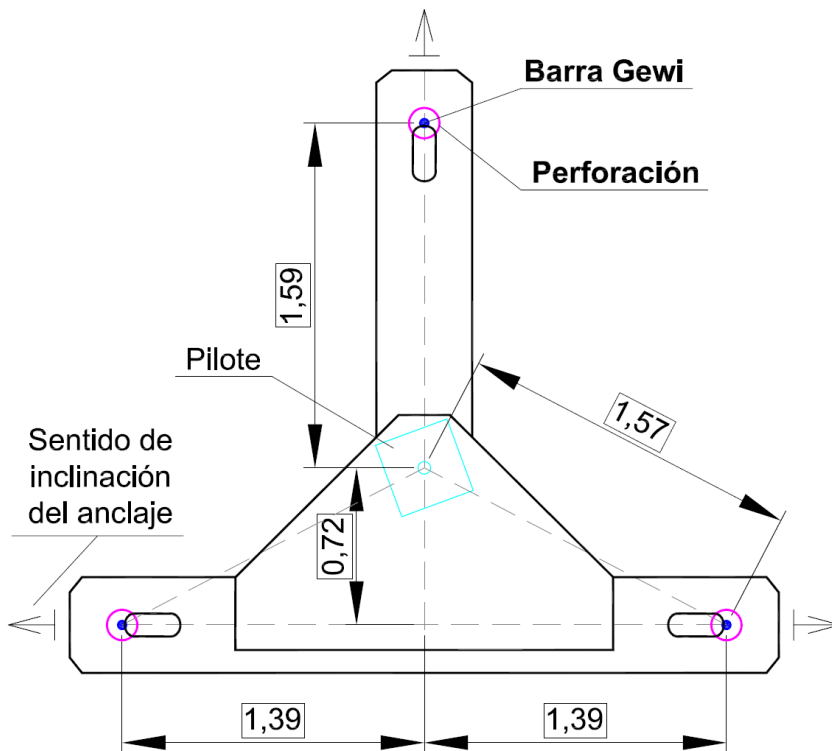


Figura IV-62: Disposición en planta de los anclajes. Croquis de replanteo

Para la realización de los anclajes se utilizó una perforadora hidráulica Casagrande M6 A-1 sobre orugas, además de varillaje de perforación, barras tipo Gewi, camisas para entubar y diverso material y equipamiento auxiliar (depósito de agua, contenedor de gasoil, planta de fabricación, mezcladora, mangueras, etc).



Figura IV-63: Inicio de los trabajos de perforación

A continuación, se ejecuta la inyección del anclaje (inyección única global), con el objetivo de constituir la zona de bulbo del anclaje y proteger al tirante frente a la corrosión. Posteriormente se introducen las barras de anclaje y se centran en su correspondiente perforación (Figura IV-64).



Figura IV-64: Anclajes finalizados. Introducción de la barra y centrado de la misma en la perforación

Una vez ejecutados los anclajes, se procede a la adecuación de la plataforma de trabajo. Para ello, se acuerda la construcción de un enchachado de grava sobre una capa de geotextil de espesor variable entre 10 y 40 cm según las zonas (Figura IV-65).



Figura IV-65: Encachado de grava sobre geotextil

Una vez finalizada la superficie de trabajo adecuada, se procede a instalar el sistema de aplicación de las cargas propiamente dicho, que comprende la sufridera del pilote, colocación y nivelación del bastidor y tesado de los anclajes.

IV.9.3 Montaje del castillete

En primer lugar, se procedió a la colocación del castillete de protección de las sondas, comprobándose el ajuste correcto que permitía la salida de las sondas y resguardando al mismo tiempo los codos. El castillete provee a su vez una superficie estable y rígida para el apoyo del gato transmitiendo y repartiendo las cargas a la cabeza del pilote (Figura IV-66).

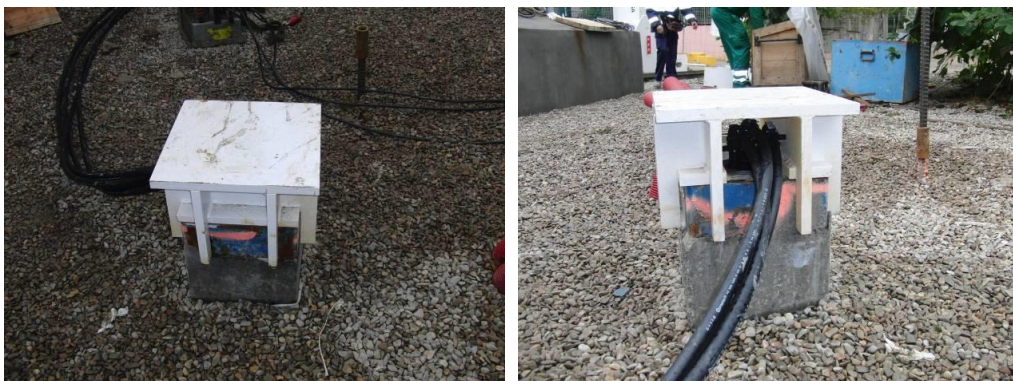


Figura IV-66: Montaje del castillete

IV.9.4 Tesado y comprobación de los anclajes

Seguidamente se llevó a cabo el tesado de los anclajes de barra, con el objetivo de llevar los anclajes hasta su valor de servicio antes de hacer la prueba de carga para

provocar las deformaciones no recuperables del primer ciclo de carga y evitar que se desarrollen durante el ensayo. Se comprobó así el correcto comportamiento de los anclajes antes de dar comienzo a los trabajos y evitar posibles deslizamientos y/o roturas de manguitos que una vez instalado el bastidor y la instrumentación sería de difícil y costosa reparación. Una vez comprobados los anclajes se acuerda dejarlos tesados a un 10% de su carga nominal para evitar así movimientos relativos, evitar desequilibrios en el comportamiento del sistema y limitar los riesgos.

El tesado se realiza contra unas vigas de reacción situadas en el suelo en vez de contra el bastidor. La carga nominal de cada anclaje es de 33 t (100 t de la carga de ensayo/número de anclajes), por lo que la carga mayorada para la comprobación es de 38 t considerando un factor de seguridad de 1,15 (+15%).

El gato empleado es un gato cilíndrico hueco tipo PAUL de sección 182,21 cm², y las características de las barras roscadas se resumen en la Tabla IV-12.

Tabla IV-12: Características de las barras roscadas

Diámetro nominal (mm)	Calidad de acero (N/mm²)	Sección	Carga en el límite elástico (kN)	Carga en el límite de rotura (kN)
40	500/550	1.257	628	691

Se establecen 4 escalones de carga para cada anclaje. A cada uno de estos escalones se llega con una carga correspondiente al % indicado sobre la carga mayorada y se mantiene dicha carga durante el tiempo asignado según la Tabla IV-13.

Tabla IV-13: Escalones de carga en los anclajes

Tiempo (minutos)	% carga	Carga (t)	Presión (bar)
1	10	4,00	22
2	50	19,00	104
5	75	28,50	156
15	100	38,00	208

La Figura IV-67 muestra la secuencia de escalones de carga con la duración en minutos de cada uno de ellos. Se observa que al final del cuarto escalón y una vez

mantenida las 210 toneladas durante los 15' de duración del mismo se descarga el anclaje.

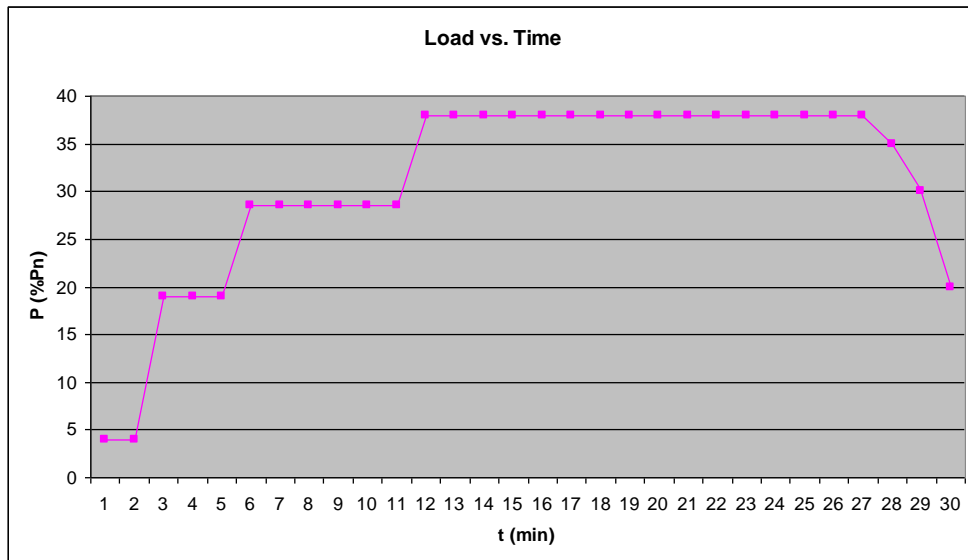


Figura IV-67: Escalones de carga en los anclajes.

No se registró incidencia ni desplazamientos en ninguno de los tres anclajes ensayados, que mantuvieron la carga aplicada en cada escalón sin ningún tipo de pérdida apreciable en el manómetro, por lo que se consideran comprobados.

IV.9.5 Instalación del bastidor de reacción

Una vez comprobados los anclajes se procedió a la colocación del bastidor metálico de reacción, con ayuda de un camión grúa (Figura IV-68), haciendo coincidir su baricentro teórico con el eje axial del pilote con la colaboración de las patas auxiliares de la estructura. Con el fin de conseguir un centrado perfecto con los manguitos de espera situados por encima de la plataforma de trabajo, se van haciendo pasar las barras Gewi de prolongación por los huecos pasantes de la estructura para hacerla coincidir con su posición final (Figura IV-69).



Figura IV-68: Instalación del bastidor



Figura IV-69: Centrado del bastidor sobre las barras

Antes de colocar las patas se disponen en el enchachado unas placas de reparto de acero de 1,5 x 1,5 m que permiten una mejor distribución de las cargas transmitidas por la estructura a la plataforma y unos tacos de madera para ajustar la distancia total requerida entre la base del castillete y la parte inferior del bastidor.

Una vez centrado el bastidor y nivelado, se sitúan las patas definitivas (las auxiliares se mantienen para favorecer el equilibrio y la estabilidad de la estructura) y las barras de prolongación de los anclajes desde la plataforma de trabajo hasta la parte superior del bastidor (Figura IV-70).



Figura IV-70: Nivelación del bastidor. Colocación de las patas y placas de reparto

Por último y con ayuda de una radial, se corta el exceso de longitud de las barras de anclaje tipo Gewi que sobresalen por la parte superior del bastidor. Se deja una longitud libre de unos 40 cm, longitud suficiente colocar las placas de anclaje con inclinación de 5° con sus tuercas correspondientes y por otro lado permitir las posteriores operaciones de tesado de los anclajes al 10% de su carga nominal, que se pueden hacer bien con llave dinamométrica o bien mediante la colocación de un puente de tesado y gato hidráulico pasante (Figura IV-71).



Figura IV-71: "Rabillo" de barras sobre bastidor. Tuerca, contratuerca y placa

En la Figura IV-72 se puede observar el aspecto final del bastidor una vez finalizado el proceso de instalación.



Figura IV-72: Estado final de la instalación

IV.10 MONTAJE DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGAS TÉRMICAS

Se instaló adyacente al pilote una instalación de climatización con el objetivo de producir las sollicitaciones térmicas necesarias para la ejecución de los ensayos térmicos diseñados, además de la monitorización de las variables asociadas. La instalación diseñada, además de la producción de frío y calor y el sistema hidráulico, cuenta con caudalímetros, sensores de temperatura y de presión que son controlados y monitorizados vía modem. De esta forma es posible controlar en todo momento la ejecución de los ensayos y modificar las condiciones de ensayo, es decir, los pulsos térmicos inyectados o extraídos.

El sistema de aplicación de cargas térmicas se compone de la instalación térmica diseñada y el sistema de conexión al pilote. Se describen a continuación por separado cada una de estas dos partes.

IV.10.1 Instalación térmica

Los principales componentes del sistema se observan en la Figura IV-73: una bomba de calor reversible, un depósito y un tanque purgador, una válvula de tres vías para regular la temperatura del agua inyectada, un medidor de flujo y varios medidores de temperatura.

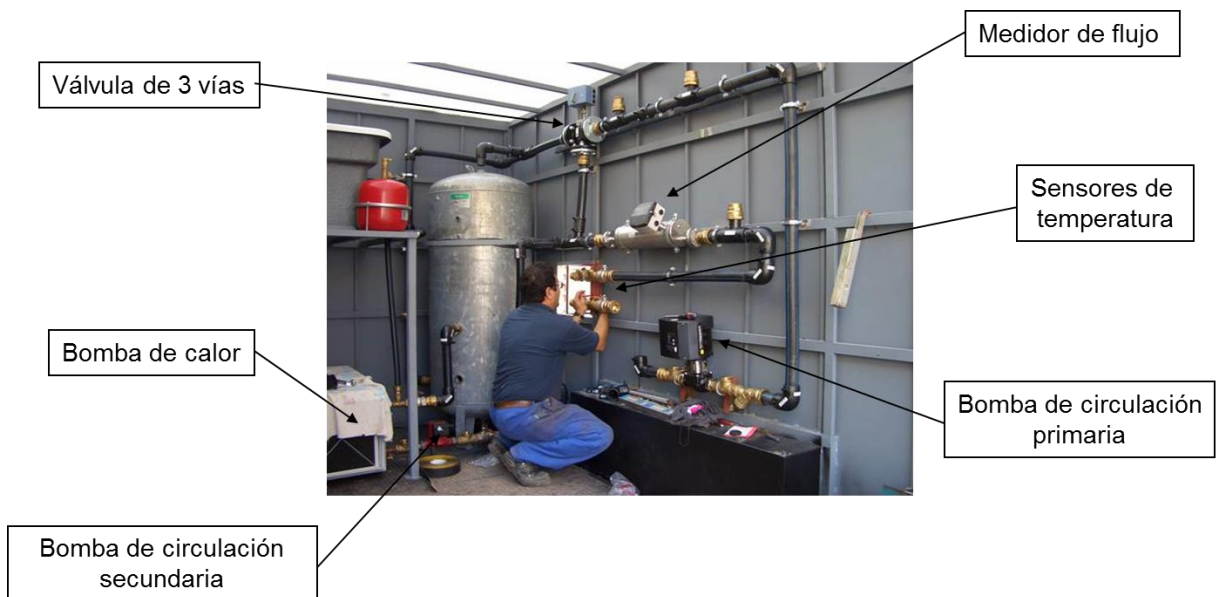


Figura IV-73: Detalle de los elementos de la instalación térmica

La regulación de la potencia inyectada al pilote se realizó a través de un panel de control que recibe los datos de temperatura de entrada y salida al pilote, y actúa sobre la válvula de tres vías para aumentar o disminuir la contribución de agua procedente del circuito secundario, con el objetivo de mantener las premisas del experimento que se esté desarrollando (Figura IV-74).



Figura IV-74: Armario con los elementos de control de la instalación

IV.10.2 Sistema de conexión con el pilote

La conexión de la instalación térmica con el pilote consiste en dos uniones en Y para juntar cada ida y retorno de la sonda geotérmica en doble U. También se instalaron dos sondas PT100 en la cabecera para recoger los datos de la temperatura (Figura IV-75).



Figura IV-75: Conexionado con el pilote geotérmico. Conexión en Y y sondas de cabecera.

IV.11 INSTRUMENTACIÓN EXTERNA DEL PILOTE

El objetivo final de este ensayo es conocer el comportamiento térmico y mecánico del pilote y el terreno que le rodea, sometido a la acción combinada y simultánea de solicitaciones de tipo térmico y mecánico. Para ello, resulta fundamental instalar una

completa instrumentación, tanto en el interior como en el exterior del pilote. La instrumentación dispuesta en el exterior del pilote es necesaria para la toma de datos de desplazamientos en cabeza, levantamientos y asentamientos del pilote.

En el exterior del pilote se dispusieron de 6 transductores diferenciales **LVDT**, para la medida de desplazamientos en la cabeza del pilote. Cuatro de ellos miden y registran desplazamientos verticales de forma continua y otros dos miden y registran desplazamientos horizontales (Figura IV-76).

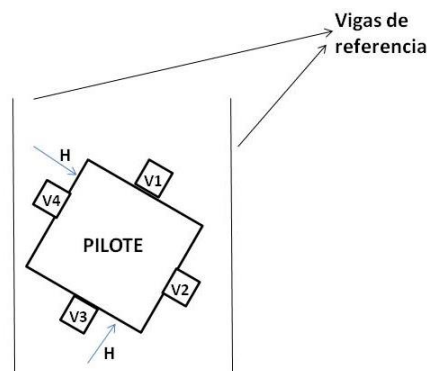


Figura IV-76. Vista en planta de la distribución de sensores LVDT

Con el fin de comparar y garantizar que las medidas de los desplazamientos fueron correctas se emplearon además 7 relojes comparadores o **flexímetros**, 5 de desplazamiento vertical y 2 de desplazamiento horizontal. Dado que se tratan de sensores analógicos, los flexímetros no permiten un registro automático de los datos, resultando necesario que una persona observe y registre las medidas en diferentes tiempos. Por ello solo se utilizaron durante el primer ensayo de carga estática (Figura IV-77 y Figura IV-78).

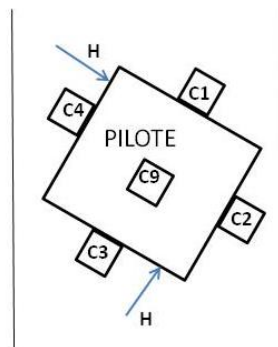


Figura IV-77. Vista en planta de la distribución de los flexímetros durante primer ensayo de carga estática.

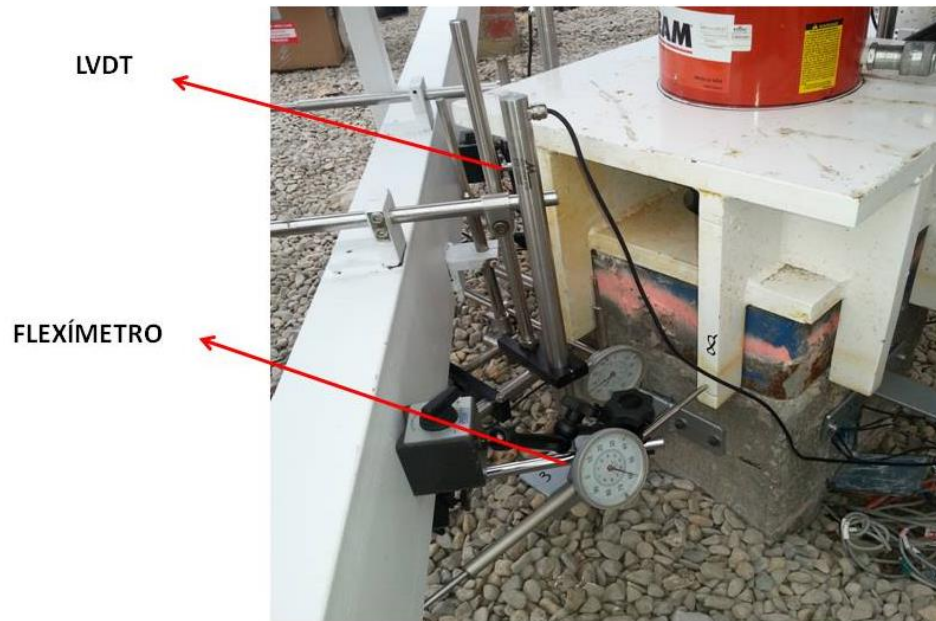


Figura IV-78. LVDT y Flexímetros dispuestos en la cabeza del pilote

Se instaló una **célula de carga** entre el bastidor y el gato hidráulico que genera la carga axial, con el fin de medir la carga real que le llegaba a la cabeza del pilote (Figura IV-79).



Figura IV-79. Célula de carga situada entre el bastidor y el gato hidráulico

CAPITULO V

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL PILOTE

Este capítulo está dedicado a estudiar el comportamiento térmico del sistema compuesto por el pilote termoactivo y el terreno que lo rodea. Para ello ha sido necesario determinar, mediante ensayos de laboratorio, los parámetros térmicos fundamentales del terreno: su conductividad térmica (λ) o capacidad para transferir el calor, su calor específico (c_p) o capacidad para almacenar energía térmica y su difusividad térmica (α), definida en base a la razón de los dos parámetros anteriores.

A partir de estos datos, y conociendo la estructura y dimensiones del pilote, así como la secuencia litológica del terreno que lo rodea, se aborda la caracterización térmica del conjunto pilote-terreno desde dos enfoques diferentes y complementarios. En primer lugar, se realiza un modelo muy simplificado del sistema pilote-terreno mediante elementos finitos y se analiza el comportamiento térmico del terreno como respuesta a la activación térmica (calentamiento y enfriamiento) del pilote durante el ensayo C, descrito en el capítulo anterior. De esta forma se determina el radio del volumen de terreno afectado por el funcionamiento geotérmico del pilote. Posteriormente se caracteriza el conjunto en términos de conductividad térmica promedio del terreno (λ_{terreno}), resistencia térmica del terreno (R_{terreno}), resistencia térmica del pilote (R_p) y resistencia térmica total del conjunto (R_t).

Para facilitar la lectura y comprensión del capítulo, se repasan brevemente a continuación los mecanismos de transferencia de calor, así como los parámetros térmicos básicos que describen a los materiales.

V.1 TRANSFERENCIA DE CALOR Y PARÁMETROS TÉRMICOS

V.1.1 *Mecanismos de transferencia de calor*

Tanto el suelo como el pilote pueden ser considerados sistemas compuestos por tres fases: la fase sólida es el esqueleto formado por las partículas minerales constituyentes del suelo, del hormigón o del mortero; la fase líquida consiste generalmente en agua y la fase gaseosa está formada por aire y vapor de agua fundamentalmente.

El transporte de calor en el sistema obedece a los tres mecanismos conocidos: *conducción*, *convección* y *radiación*. Esta última juega en general un papel poco importante en términos cuantitativos en el sistema que se discute en esta tesis lo que, en la línea de la mayor parte de los autores que se referencian, se excluirán términos

radiactivos de la formulación de las ecuaciones del mismo. Los dos mecanismos principales se resumen brevemente a continuación.

V.1.1.1 *Conducción*

Conducción es la transferencia de calor a través de un medio por interacción entre partículas adyacentes, sin movimiento visible en el medio. Siempre que existe un gradiente de temperaturas en un medio sólido, el calor fluirá desde la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura según expresa matemáticamente la Ley de Fourier. La potencia calorífica que se transfiere por conducción q es proporcional al gradiente de temperatura (dT/dx) y área (A) a través de la cual se transfiere el calor:

Ecuación V-1

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

Donde λ es la constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica (W/m·K) y refleja las propiedades conductoras del material.

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.

V.1.1.2 *Convección*

Convección es el modo en que se transfiere la energía térmica (fundamentalmente en líquidos o gases) mediante el movimiento del propio fluido, como por ejemplo el provocado por las diferencias de densidad del mismo (convección natural) o mediante la concurrencia de fuentes de energía externas (convección forzada). Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, se producirá un movimiento de forma que las partículas más calientes y, por tanto, menos densas, ascienden, desplazando a las más frías, que se hunden por gravedad. Éstas, al calentarse posteriormente, ascienden de nuevo, generando células convectivas de

movimientos circulares. Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección (Llopis y Rodrigo, 2008).

La variación de calor convectivo por unidad de tiempo en un elemento diferencial de volumen dV debido al flujo de un fluido con una velocidad V es (Katzenbach et al., 2007):

Ecuación V-1

$$\dot{q}_v = (\rho c)_f \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}(V_x T) + \frac{\partial}{\partial y}(V_y T) + \frac{\partial}{\partial z}(V_z T) \right) = (\rho c)_f \cdot \text{div}(VT)$$

Donde

q_v es la cantidad de calor por unidad de tiempo y volumen (W/m^3)

c_f es la capacidad calorífica específica del fluido ($J/Kg \cdot K$)

ρ_f es la densidad del fluido (Kg/m^3)

$V = -k \cdot \text{grad } h$, velocidad de flujo (m/s)

k es el coeficiente de permeabilidad (m/s)

$\text{grad } h$ es el gradiente hidráulico

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

V.1.1.3 Radiación

Radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas debidas a la temperatura. Todos los materiales a temperatura superior al cero absoluto ($-273^\circ C$) emiten radiación térmica, tanto mayor cuanto mayor es su temperatura. 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.

V.1.1.4 *Transferencia total de calor en el terreno. La Ley de Fourier*

Bear (1972) ya se dio cuenta de que el transporte de calor en el suelo se produce fundamentalmente mediante conducción y convección, posteriormente se confirmó que, de cualquier forma, la radiación puede ser despreciada.

Considerando los mecanismos de conducción y convección en un medio isotrópico y asumiendo que existe equilibrio térmico local, es decir, que las temperaturas de la fase sólida y líquida del suelo son iguales, y por lo tanto no hay transferencia de calor de una fase a otra y la transferencia de calor tiene lugar paralelamente en ambas fases al mismo tiempo, las ecuaciones diferenciales de transporte de calor resultan (Katzenbach et al., 2007):

Ecuación V-2

$$\begin{aligned} \mathit{div} \left((1-n)\lambda_s \mathit{grad} T_s \right) + Q_{i,s} &= (1-n)(\rho c)_s \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} \\ \mathit{div} \left(n\lambda_f \mathit{grad} T_f \right) + \mathit{div} \left((\rho c)_f \delta_\lambda |V| \mathit{grad} T_f \right) - (\rho c)_f \mathit{div} (V \cdot T_f) + Q_{i,f} & \\ &= n \cdot (\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \end{aligned}$$

Donde:

n es la porosidad

$(\rho c)_f$ es la capacidad calorífica volumétrica de la fase fluida (J/m³·K)

$(\rho c)_s$ es la capacidad calorífica volumétrica de la fase sólida (J/m³·K)

Sumando las dos ecuaciones anteriores, surge la ecuación diferencial de transporte de calor:

Ecuación V-3

$$\mathit{div} \left((\lambda + (\rho c)_f \delta_\lambda |V|) \mathit{grad} T \right) - (\rho c)_f \mathit{div} (VT) + Q_i = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Si los granos del suelo y el tamaño de poro son lo suficientemente pequeños en relación con el volumen de suelo tomado, la transferencia de calor se puede reducir un único mecanismo de conducción. Entonces la ecuación puede reescribirse de la siguiente manera:

Ecuación V-4

$$q = -\lambda \mathit{grad} T = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_x + \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \frac{\partial T}{\partial z} e_z \right)$$

Ésta es conocida como la Ley de Fourier (Figura V-1), según la cual, siempre que existe un gradiente de temperatura en un medio sólido, el calor fluirá desde la región con mayor temperatura a la región con menor temperatura. Bajo tales condiciones, la potencia calorífica que se transfiere por conducción a través de una superficie de área A es proporcional al gradiente de temperatura y al área a través de la cual se transfiere el calor (Bird et al., 2006).

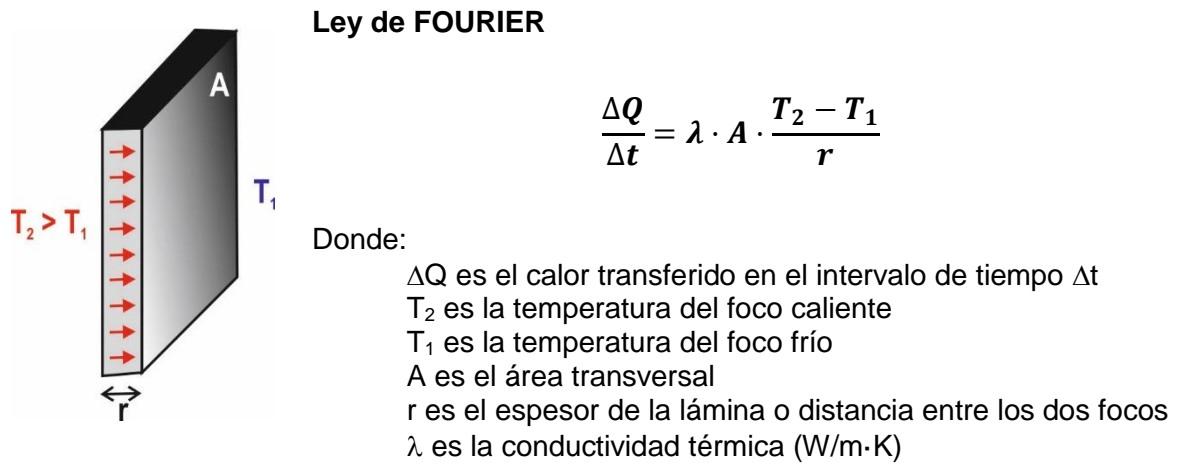


Figura V-1. Ley de Fourier

V.1.2 Definición de los parámetros térmicos básicos

V.1.2.1 Capacidad calorífica

La capacidad calorífica es la energía necesaria para aumentar 1 K la temperatura de un cuerpo cualquiera. 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. La capacidad calorífica viene definida matemáticamente por:

Ecuación V-5

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

Donde:

C es la capacidad calorífica, en Julios/K (o cal/°C)

Q es el calor absorbido por el sistema (Julios o Cal).

ΔT es la variación de temperatura (K ó °C)

V.1.2.2 Calor específico

Como se ha mencionado en el apartado anterior, 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:

Ecuación V-6

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

Donde:

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

m es la masa de sustancia considerada (Kg)

De manera formal, el calor específico es la energía necesaria para incrementar en 1 K una cantidad unitaria de sustancia (1 kg). Expresada en el sistema internacional su unidad es el J/kg·K.

Un parámetro relacionado con el calor específico 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 (Llopis y Rodrigo, 2008).

V.1.2.3 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 1K/m (1 grado Kelvin por metro). Se expresa en W/m ó W/m·K (Llopis y Rodrigo, 2008).

Es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Matemáticamente se define como:

Ecuación V-7

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

Donde:

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

q es flujo de calor por unidad de tiempo o por unidad de área: $\frac{W}{m^2} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot m^2}$

λ es la conductividad térmica: $\frac{W}{m \cdot K} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot m \cdot K}$

dT/dx es el gradiente de temperatura a través del medio conductor

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.

V.1.2.4 Difusividad térmica

La difusividad térmica describe la velocidad con la que cambios de temperatura en una determinada zona del terreno se propagan a otras regiones. Este parámetro se usa habitualmente en los modelos de comportamiento térmico y viene definida por la conductividad térmica dividida por el producto del calor específico y la densidad (Ecuación V-8). Sus unidades en el Sistema Internacional son m²/s.

Ecuación V-8

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

Donde:

α es la **difusividad térmica** (m²/s)

λ es la conductividad térmica (W/m·K)

ρ es la densidad del suelo (kg/m³)

c es el calor específico (J/kg·K)

V.2 MODELADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

El empleo de métodos numéricos mediante elementos finitos permite la resolución de un problema físico determinado. Este método numérico se basa en dividir la geometría en la que se quiere resolver un problema físico en pequeños elementos en los cuales se resuelven las en forma discreta las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo (en este caso, el campo de temperaturas en distintos momentos) teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno de vecindad, las condiciones de contorno y las fuentes de calor. La resolución de estas

ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución.

V.2.1 Planteamiento del modelo

Se ha realizado un análisis por elementos finitos con el fin de comparar las diferentes situaciones térmicas existentes en el pilote y el terreno circundante en los seis momentos estratégicos identificados para el estudio de su comportamiento tenso-deformacional durante el ensayo C (C_0 , C_a , C_b , C_c , C_d y C_e), detallado en el capítulo anterior (Figura V-2). Para ello se ha utilizado el programa TEMP/W 2007 de la casa GEO-SLOPE International Ltd (www.geo-slope.com).

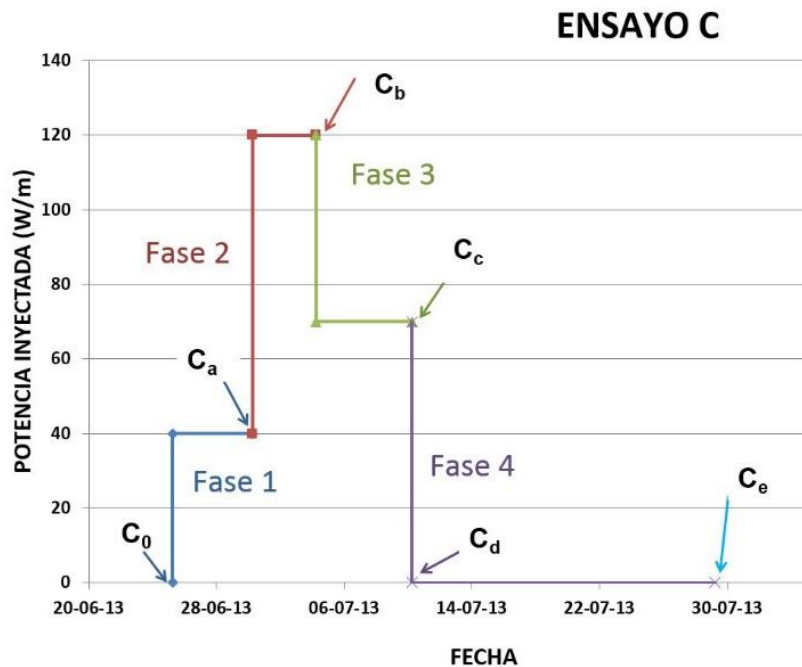


Figura V-2. Identificación de los 6 momentos estudiados a lo largo del ensayo C

El estudio ha consistido en una secuencia de pasos metodológicos incluyendo:

- **La definición de la geometría:** Mediante herramientas de apoyo de tipo CAD, se ha dibujado una malla en 2D con los diferentes objetos en los que se pretenden resolver las ecuaciones de campo. En este estudio se han definido un modelo axisimétrico de pilote cilíndrico y el cilindro de terreno de 50 m de radio alrededor del pilote, para garantizar que las condiciones de contorno impuestas no afectan al desarrollo del modelo:

- El pilote representado es cilíndrico, de igual longitud al real y con un diámetro de sección tal que presenta un área equivalente al pilote de sección cuadrada hincado que se trata de representar. En su interior se ha modelado una tubería única de área equivalente a los cuatro tubos de la sonda geotérmica instalada. La temperatura de dicho tubo equivalente es constante en cada momento del ensayo y equivale al promedio de la temperatura de entrada y salida del fluido caloportador.
 - Los diferentes niveles geológicos identificados en el terreno, con sus correspondientes espesores y propiedades físicas.
- **Especificación del régimen a estudiar:** Por la propia naturaleza del estudio realizado, durante el cual se varía la inyección de calor en el interior del terreno a lo largo del desarrollo del ensayo, el régimen necesariamente debe ser transitorio. En este caso, se definieron unas condiciones térmicas iniciales en estado permanente, correspondientes al momento C_0 , a partir de las cuales, se pasa por los diferentes estadios del ensayo en régimen transitorio ($C_a \rightarrow C_b \rightarrow C_c \rightarrow C_d \rightarrow C_e$).
 - **Asignación de las propiedades físicas de los materiales:** En este caso y a partir del estudio de muestras de laboratorio de los diferentes estratos, se han asignado valores de conductividad térmica, densidad y calor específico, a cada uno de los estratos definidos en el terreno, así como a los diferentes materiales que conforman el pilote (
 - Tabla V-1).

Tabla V-1. Propiedades de los materiales introducidas en el modelo

Prof	Material	λ	C_v	ρ
		W/m·K	MJ/m ³ ·K	t/m ³
0 – 1	Relleno*	0,77*	1,269*	1,80*
1 – 2	Limos arcillosos marrones desecados	0,77	1,269	2,0
2 – 7,8	Arcillas limosas saturadas	1,611	2,513	1,90
7,8 – 13,8	Gravas y arenas	3,267	1,593	2,20
13,8 – 15	Arcillas limosas de consistencia firme	1,872	2,380	1,90
15 - 17	Gravas y arenas	3,267	1,593	2,20
Pilote	Mortero relleno	2,50	2,10	2,07
	Hormigón	1,63	2,52	2,40
	Agua	0,60	1,80	1,00
	PEAD	0,5	1,9	

* El nivel de relleno existente entre 0 y 1 m de profundidad no ha sido estudiado mediante muestras en laboratorio. Por esta razón, se le asignan los valores del nivel geológico infrayacente.

- **Asignación de las condiciones de contorno:**
 - En la superficie del terreno se ha impuesto una condición de temperatura constante (isoterma). En cada momento estudiado (C_0 , C_a , C_b , etc.) se ha asignado a esta isoterma el valor de la temperatura ambiental registrada por el sensor durante el desarrollo del ensayo.
 - En la superficie de contacto entre el pilote y el terreno, se ha impuesto como mecanismo de transferencia de calor la conducción, obviando en este estudio preliminar el efecto de la convección de los fluidos en el interior de los poros del terreno. Un siguiente paso de mayor complejidad consistiría en incorporar este mecanismo de transporte de calor de tipo convectivo.

- **Aplicación de las cargas:** Entendiendo por cargas, las fuentes de calor presentes en el sistema durante el desarrollo del ensayo C. Por simplicidad, en lugar de expresar esta generación de calor mediante un valor neto [W] o bien mediante una densidad de generación de calor [W/m^3], se ha impuesto la temperatura del fluido caloportador, constante en cada momento del estudio y calculada como el promedio de las temperaturas de entrada y salida.

- **Mallado de la geometría:** La geometría objeto de estudio se ha dividido en elementos cuadrados y triangulares con un tamaño aproximado de 0,5 m. De esta forma, se ha creado una malla compuesta de 1494 elementos y 1562 nodos.

- **Resolución del problema:** Con las condiciones explicadas anteriormente, se aplica el método de análisis por elementos finitos para obtener la transmisión del calor de forma iterativa, en cada uno de los elementos en que se descompone la geometría. De esta forma se obtiene la distribución de temperaturas en pilote y terreno circundante, que se puede representar gráficamente. Repitiendo este procedimiento para cada momento estratégico identificado en el estudio tenso-deformacional del pilote durante el ensayo C, es posible estudiar la evolución térmica del pilote y el terreno a medida que se desarrolla el mismo.

En la Figura V-3 se puede observar la definición geométrica del modelo, en la que se distingue el pilote, considerado axisimétrico y una franja de terreno de 15 m de distancia a partir del mismo. En el terreno se han diferenciado los estratos cuyas

características geológicas, geotécnicas y térmicas han sido determinadas mediante ensayos de laboratorio.

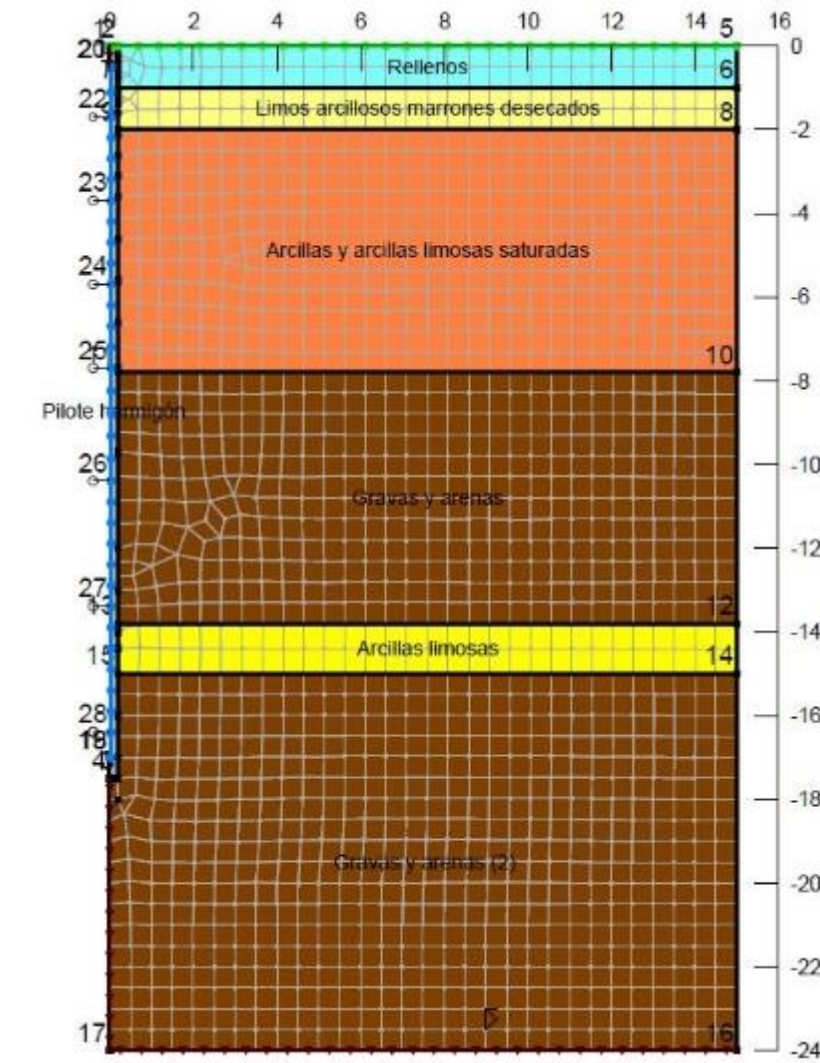


Figura V-3. Modelo del pilote axisimétrico y terreno con los estratos definidos

V.2.2 El momento C_0

La Figura V-4 corresponde al momento C_0 , (27 de junio de 2013, a las 9:30h) previamente a la inyección de calor en el interior del pilote. Se observa que la temperatura ambiente ($22,9^{\circ}\text{C}$), menor que la temperatura promedio de los dos tubos que componen el intercambiador de calor ($26,25^{\circ}\text{C}$), condiciona en gran medida la disposición de las isotermas.

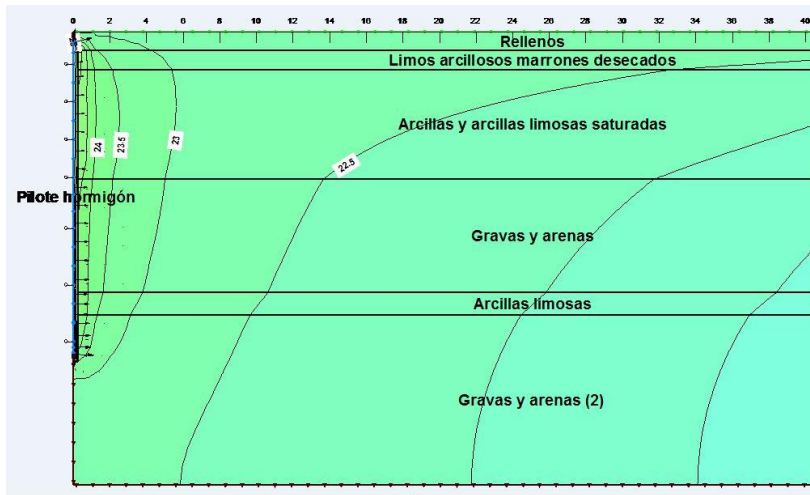


Figura V-4. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_0

Se muestra en la Figura V-5 la función que describe la influencia térmica del pilote sobre el terreno en función de la distancia a 4 m y 16 m de profundidad respectivamente. Se observa que, a los 4 m de profundidad, la temperatura del terreno se encuentra fuertemente determinada por la temperatura ambiente. De cualquier manera, las dos curvas tienden a estabilizarse en un valor constante a partir de una distancia de 4-5 m del pilote.

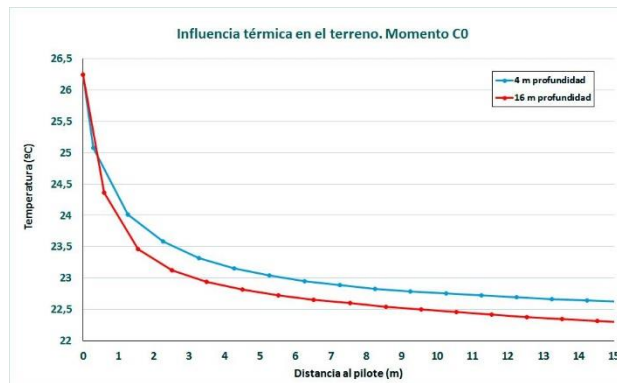


Figura V-5. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_0

V.2.3 El momento C_a

Este momento corresponde al día 1 de julio de 2013 a las 12:27h, al final de la fase1 de inyección de 40 W/m (Figura V-6). La temperatura ambiente es de 30,4°C, mientras que la temperatura promedio entre los dos tubos de intercambio geotérmico es 28,14°C. Ello condiciona la forma de las isotermas, que definen claramente dos fuentes de calor perpendiculares en el terreno, la superficie del suelo y la del pilote. La afección de los primeros metros de profundidad, tanto en el terreno como en el propio pilote, se hace más patente.

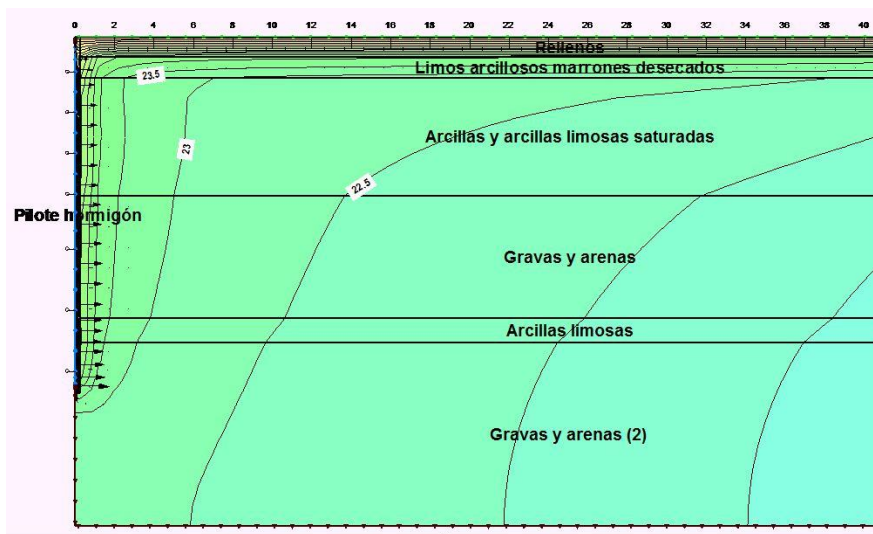


Figura V-6. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_a

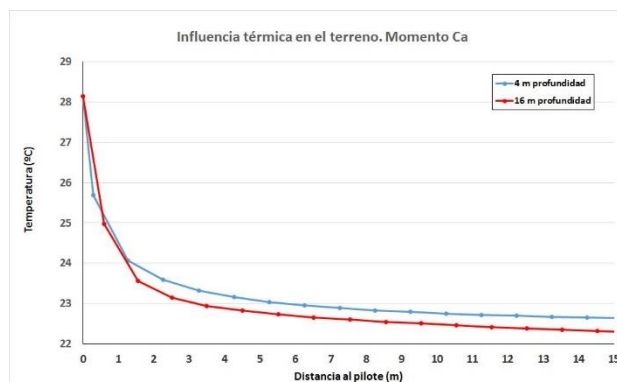


Figura V-7. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_0

V.2.4 El momento C_b

Corresponde al día 5 de julio de 2013 a las 12:27, tras la estabilización de la fase 2, durante la cual se inyectaron 120 W/m en el pilote (Figura V-8). La temperatura ambiental es 32,3°C y la temperatura promedio de los dos tubos que componen el intercambiador geotérmico del pilote es 44,42°C. En la función de influencia térmica del pilote se observa un gradiente térmico muy elevado en los primeros 1-2 m de terreno en torno al mismo, aunque se sigue estabilizando a partir de los 4-5 m de distancia, tanto a 4 como a 16 m de profundidad.

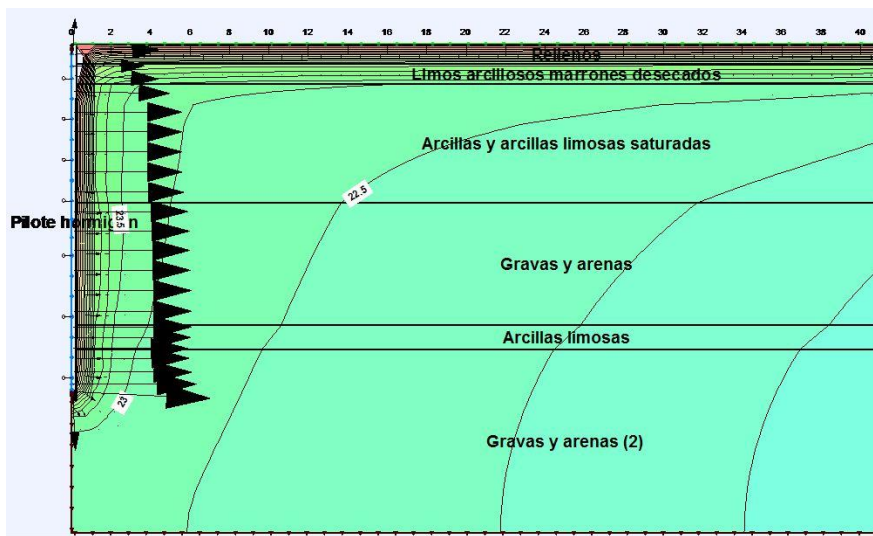


Figura V-8. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_b

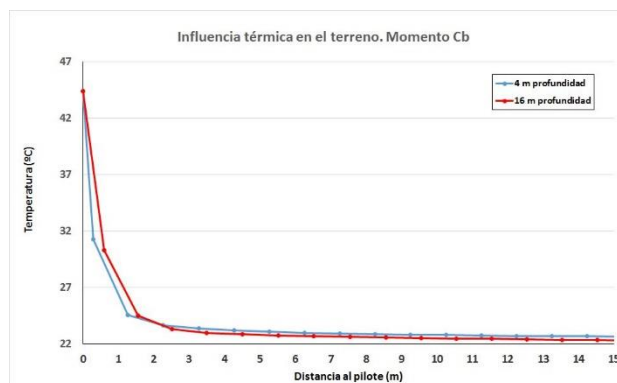


Figura V-9. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_b

V.2.5 El momento C_c

Corresponde al día 10 de julio de 2013 a las 00:00 h, tras la estabilización de la fase 3 durante la cual se inyectaron 70 W/m en el pilote (Figura V-10). La temperatura ambiental es 26,2°C y la temperatura promedio de los dos tubos que componen el intercambiador geotérmico del pilote es 35,38°C. El pilote sigue siendo la principal fuente de calor en el terreno inmediatamente adyacente. A medida que aumenta la distancia, se hace más patente la influencia de la temperatura ambiental en la disposición horizontal de las isotermas.

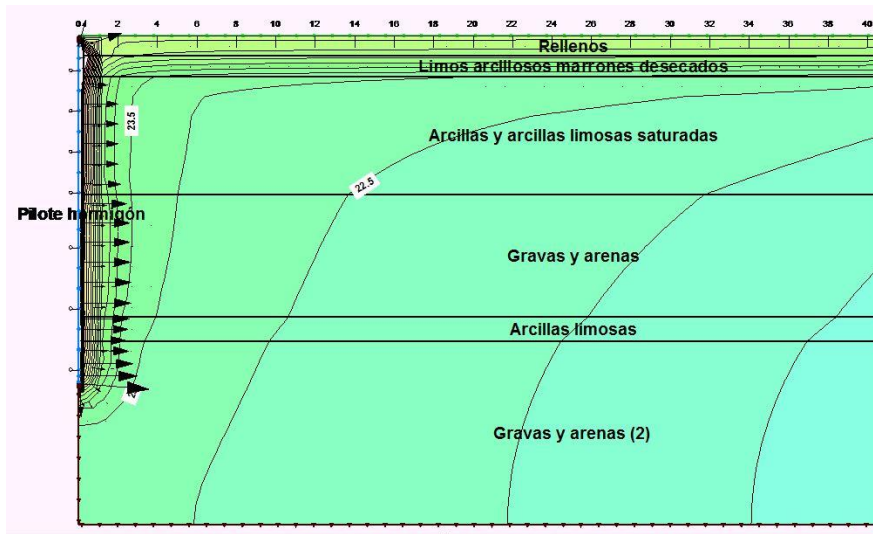


Figura V-10. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_c .

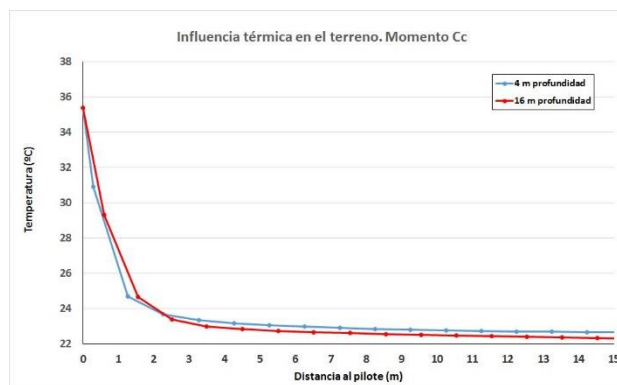


Figura V-11. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_c .

V.2.6 El momento C_d

Corresponde al día 11 de julio de 2013, a las 00:00, momento en el que se interrumpe la inyección de calor en el pilote (Figura V-12). La temperatura ambiental es 23,1°C y la temperatura promedio de los dos tubos que componen el intercambiador geotérmico del pilote es de 26,55°C.

Se observa por primera vez que el terreno muestra en las inmediaciones del pilote, unas temperaturas superiores a las medidas en el intercambiador geotérmico, debido a la inercia térmica, muy superior en los niveles arcillosos que en los niveles de arenas y gravas.

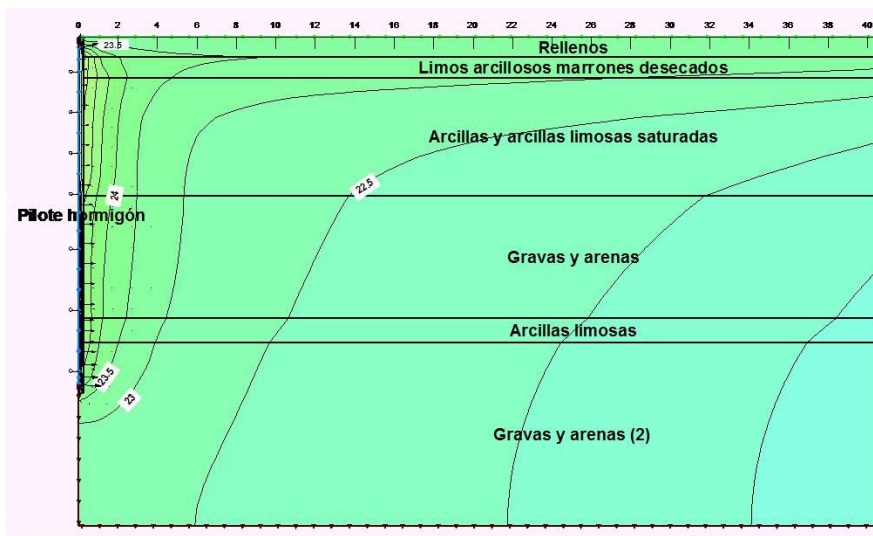


Figura V-12. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_d

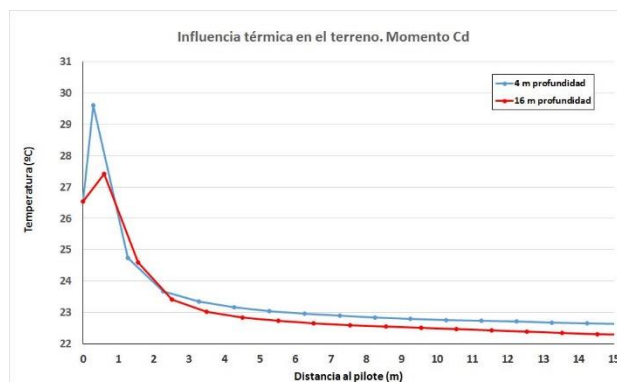


Figura V-13. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_d

V.2.7 El momento C_e

Corresponde al día 30 de julio de 2013, a las 10:07, aproximadamente dos semanas tras la finalización del ensayo térmico (Figura V-14). Durante todo este tiempo no se ha inyectado calor y se ha permitido al pilote y terreno recuperarse térmicamente. La temperatura ambiental es $29,8^{\circ}\text{C}$ y la temperatura promedio de los dos tubos que componen el intercambiador geotérmico del pilote es $22,60^{\circ}\text{C}$. La distribución de isotermas en el terreno, incluyendo las inmediaciones del pilote, se encuentra fundamentalmente determinada por la elevada temperatura ambiental, propia de las fechas en que se realizó el ensayo, muy superior a la temperatura del pilote. Por esta razón el calor se transfiere desde el terreno al pilote.

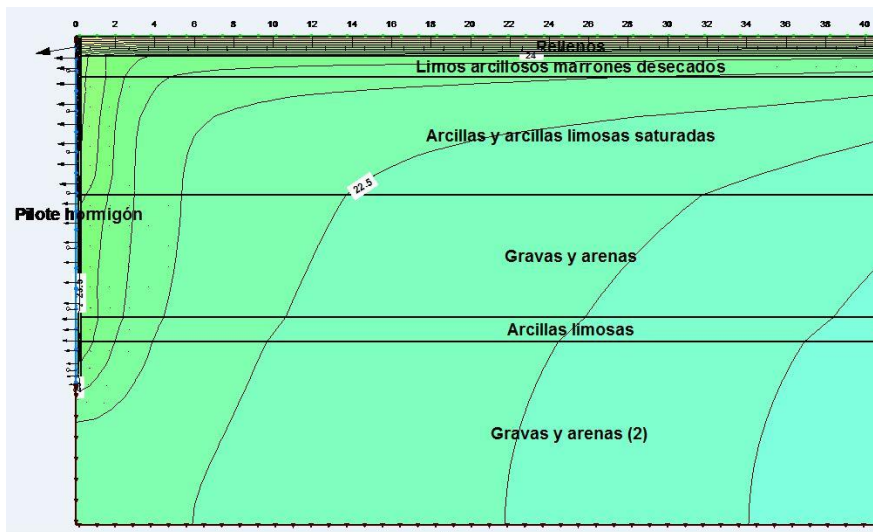


Figura V-14. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_e .

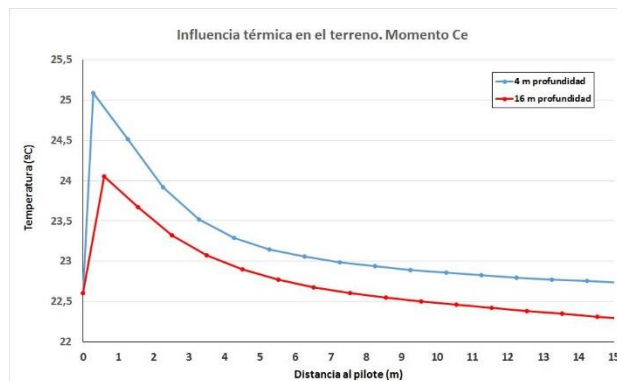


Figura V-15. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_e .

V.2.8 Influencia térmica del pilote en el terreno

Se muestran a continuación, a modo de resumen y comparación, las curvas de variación de la temperatura del terreno en función de su distancia al pilote, correspondientes a 4 m y 16 m de profundidad.

A 4 m de profundidad se observa que la máxima dispersión de valores se encuentra directamente en la superficie de contacto entre el pilote y el terreno. Se identifica además un comportamiento similar en la curva correspondiente a los momentos Cd y Ce, durante los cuales era mayor la temperatura del terreno, debido a la inercia térmica de la inyección de calor previa, que en el interior del pilote. De cualquier forma, se advierte una tendencia a la estabilización de la temperatura en el terreno, en torno a 22,8°C, a partir de los 3 primeros metros de distancia del pilote.

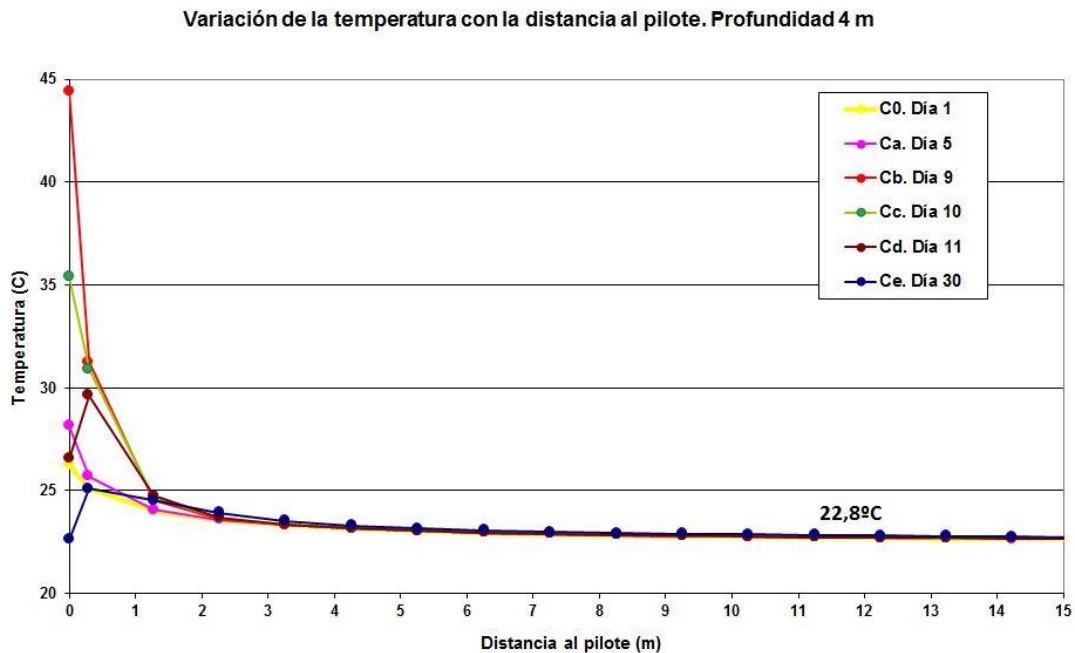


Figura V-16. Influencia térmica del pilote sobre el terreno a 4 m de profundidad

A 16 m de profundidad se observa que, de forma similar al caso anterior, la máxima dispersión de valores se encuentra directamente en la superficie de contacto entre el pilote y el terreno (Figura V-17). Se encuentra también, aunque de una forma menos acusada, el comportamiento identificado en las curvas correspondientes a los momentos Cd y Ce, durante los cuales era mayor la temperatura del terreno, debido a la inercia térmica. La menor intensidad de este fenómeno a 16 m de profundidad se

debe a la litología. Las arcillas y arcillas limosas saturadas que se encuentran a 4 m de profundidad presentan un mayor calor específico (mayor inercia térmica) que las gravas y arenas presentes a los 16 m. Finalmente, se advierte una tendencia a la estabilización de la temperatura en el terreno, en torno a 22,5°C, a partir de los 3 primeros metros de distancia del pilote. Este valor es ligeramente inferior al promedio alcanzado a los 4 m de profundidad, probablemente por la influencia de las elevadas temperaturas ambientales durante el desarrollo del ensayo que, como ha quedado demostrado con el modelo, afectan fuertemente a la distribución de isotermas en los primeros metros de profundidad.

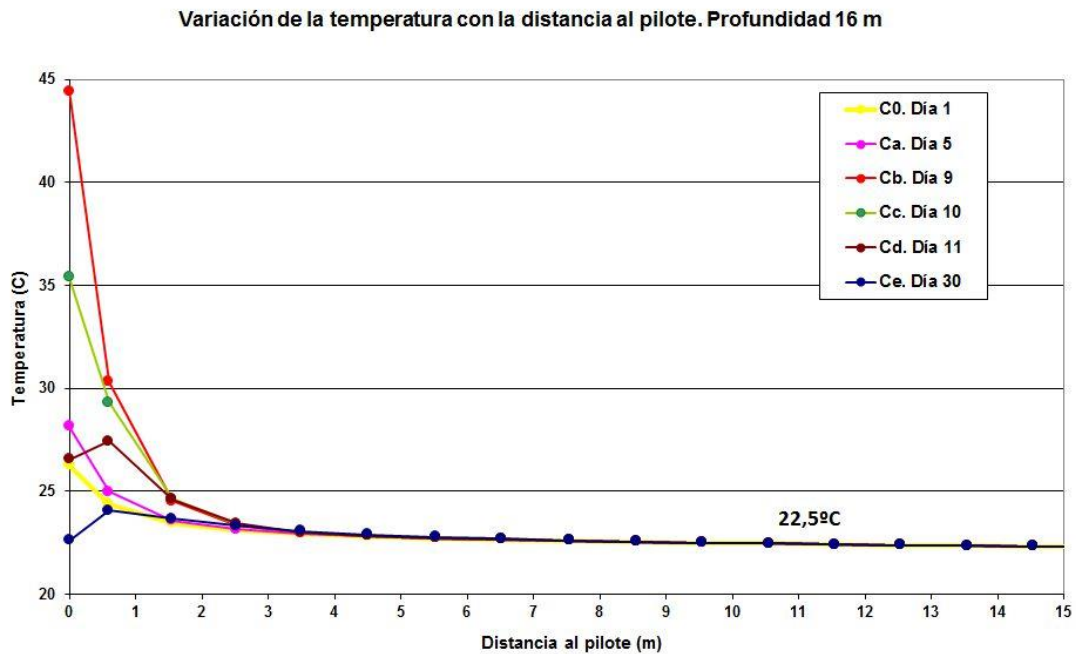


Figura V-17. Influencia térmica del pilote sobre el terreno a 16 m de profundidad

V.3 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA PILOTE-TERRENO

Una vez hincado el pilote en el terreno, es posible caracterizar el conjunto formado por el pilote y el cilindro de terreno afectado térmicamente por el mismo mediante la **resistencia térmica total** (R_T), definida como la suma de la resistencia térmica del terreno que rodea el pilote (R_{terreno}) y la resistencia térmica del pilote termoactivo (R_b), calculada a su vez como la resistencia existente en el flujo de calor entre el fluido caloportador y la pared del pilote (Figura V-18).

Ecuación V-9

$$R_T = R_b + R_{\text{terreno}}$$

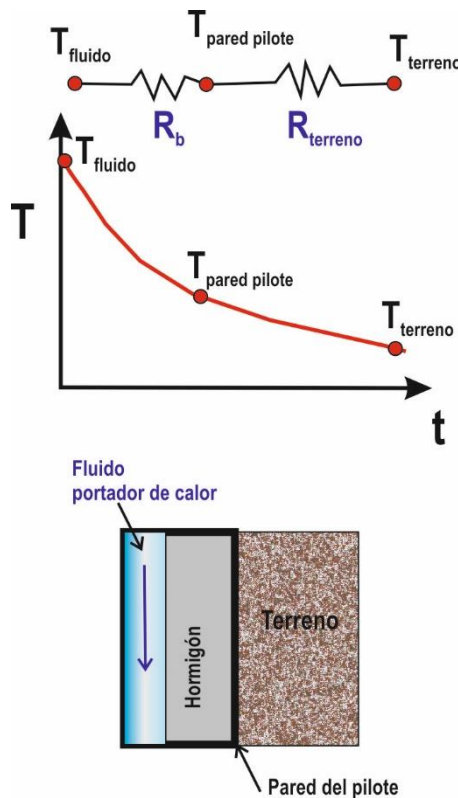


Figura V-18. Resistencia térmica del pilote (R_b) y del terreno (R_{terreno})
(modificado de Badenes, 2013)

Para dotar de valores numéricos a estos parámetros, se puede realizar una aproximación numérica a partir de los registros obtenidos durante el ensayo TRT,

basando los cálculos en el modelo matemático de la fuente de calor lineal infinita, o una determinación a partir de dos fuentes de datos experimentales: por un lado, las medidas de conductividad térmica realizadas mediante el ensayo de la aguja térmica en muestras de las diferentes capas geológicas atravesadas por el pilote, que permiten asignar un rango de valores o un valor promedio a cada nivel geológico. Ponderando el valor de las conductividades térmicas con la potencia o espesor del estrato atravesado, es posible calcular un valor promedio del terreno que rodea al pilote. Por otro lado, conociendo las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador durante el ensayo C, junto con las potencias térmicas inyectadas en cada fase del ensayo, se puede aplicar la Ley de Fourier y determinar el valor de Rb del pilote.

V.3.1 Aproximación mediante el modelo de la fuente de calor lineal infinita

Desde un punto de vista matemático, los principales modelos de análisis para evaluar el comportamiento térmico de un sondeo o un pilote geotérmico y el terreno circundante se basan en aproximaciones analíticas mediante el modelo de fuente lineal o cilíndrica de Carslaw (1959). Utilizado por primera vez en 1983 por Mogensen para estimar las propiedades térmicas del terreno, en la actualidad es un método ampliamente aceptado por su simplicidad y rapidez de resultados. Según este modelo, el campo térmico 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.

Badenes (2013), describe y desarrolla este modelo detalladamente, partiendo de la ecuación fundamental de la conducción de calor dada para una fuente de calor puntual (Carslaw, 1959), hasta deducir la variación de temperatura con el tiempo (t), a partir de una distancia radial (r) de la fuente lineal:

Ecuación V-10

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

Donde:

$T_{q(r,t)}$ es la temperatura en un momento t a una distancia r de la fuente de calor lineal (K).

- q es el flujo de calor (W)
- Q es el flujo de calor por unidad de longitud (W/m)
- L es la longitud activa de intercambio de calor (m)
- $\alpha = \lambda/c$ es la difusividad térmica del terreno (m²/s)
- λ es la conductividad térmica (W/m·K)
- r es la distancia radial de la fuente lineal de calor (m)
- γ es la constante de Euler ($\gamma = 0,5772$)

Esta ecuación se cumple, admitiendo un error del 10%, a partir del momento t que cumpla la siguiente ecuación:

Ecuación V-11

$$t \geq \frac{5r^2}{\alpha}$$

Aplicando la ecuación general, y conociendo la temperatura inicial del terreno sin perturbar T_0 , y la temperatura en la pared del intercambiador de calor $T_{r_0}(t)$ es posible calcular la conductividad térmica promedio del terreno (λ) mediante la siguiente ecuación:

Ecuación V-12

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

Donde:

- T_{r_0} es la temperatura en la pared del intercambiador en un momento dado (K).
- T_0 es la temperatura inicial del terreno (K)
- $\alpha = \lambda/c$ es la difusividad térmica del terreno (m²/s)
- L es la longitud activa de intercambiador (m)
- t es el tiempo (s)
- λ es la conductividad térmica (W/m·K)
- r es la distancia radial de la fuente lineal de calor (m)
- γ es la constante de Euler ($\gamma = 0,5772$)

Por otro lado, este modelo permite calcular la resistencia térmica total del sistema a partir del comportamiento térmico durante un ensayo TRT. Durante este ensayo se inyecta una potencia térmica en el sondeo mediante un fluido caloportador que entra en el sistema a una temperatura (T_{in}) y sale con una temperatura diferente (T_{out}) tras

haber intercambiado calor con el terreno a través del sondeo. Como primera aproximación, se puede considerar una temperatura media del fluido en el intercambiador, calculada como el promedio de la temperatura del fluido a su entrada y a su salida del sistema geotérmico (T_f)

Ecuación V-13

$$T_f = T_{ave} = \frac{T_{in} - T_{out}}{2}$$

El flujo de calor (q) que se establece entre el fluido caloportador, con una temperatura (T_f) y el terreno, con una temperatura inicial de T_0 , resulta proporcional al salto térmico existente entre ambos extremos, siendo la constante de proporcionalidad la resistencia térmica del sistema sondeo-terreno R_b [K/W/m]:

Ecuación V-14

$$T_f - T_{ro}(t) = R_b \cdot q$$

Aplicando esta igualdad a la ecuación anterior se obtiene:

Ecuación V-15

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

Despejando la resistencia térmica R_b de la ecuación:

Ecuación V-16

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

Donde

Q_z es el flujo de calor por unidad de longitud (W/m)

T_f se puede aproximar a la temperatura media del fluido en el intercambiador, calculada como el promedio de la temperatura del fluido a su entrada y a su salida del sistema geotérmico.

T_0 es la temperatura inicial del terreno

$\alpha = \lambda/c$ es la difusividad térmica del terreno (m^2/s)

λ es la conductividad térmica (W/m·K)

r es la distancia radial de la fuente lineal de calor (m)

γ es la constante de Euler ($\gamma = 0,5772$)

Montero et al. (2013) propone una simplificación más, adaptando la ecuación VI-17 a la ecuación de una recta:

Ecuación V-17

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

Siendo:

k la pendiente de la línea resultante que, a su vez se relaciona con la conductividad térmica del terreno (λ) según la siguiente expresión: $k = \frac{1}{4\pi\lambda}$

m es la ordenada en el origen, que corresponde al momento t designado como origen (t_0).

Considerando la resistencia térmica (R_b) un valor constante en el tiempo:

Ecuación V-18

$$m = T_0 + R_b \cdot Q_z$$

Y el término dependiente del tiempo:

Ecuación V-19

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

V.3.2 Aplicación del modelo numérico al ensayo de respuesta térmica del pilote

Con el fin de caracterizar térmicamente el pilote en términos de conductividad térmica media del terreno y resistencia térmica del pilote, se realizaron dos inyecciones de calor, con las condiciones experimentales que se enumeran en la siguiente tabla.

Tabla V-2: Características de los dos ensayos térmicos

	Ensayo 1	Ensayo 2
Salto térmico	1 K	2 K
Caudal	0,6 m ³ /h (10 l/min).	0,6 m ³ /h (10 l/min).
Fluido	Agua de red	Agua de red
Potencia inyectada	700 W	1.400 W
Relación de potencia	40 W/m	80 W/m
Duración	5 días	6 días

En la Figura V-19 se puede observar la evolución de la temperatura media, calculada como el promedio de la temperatura de entrada y salida del fluido caloportador, a lo largo de los dos ensayos.

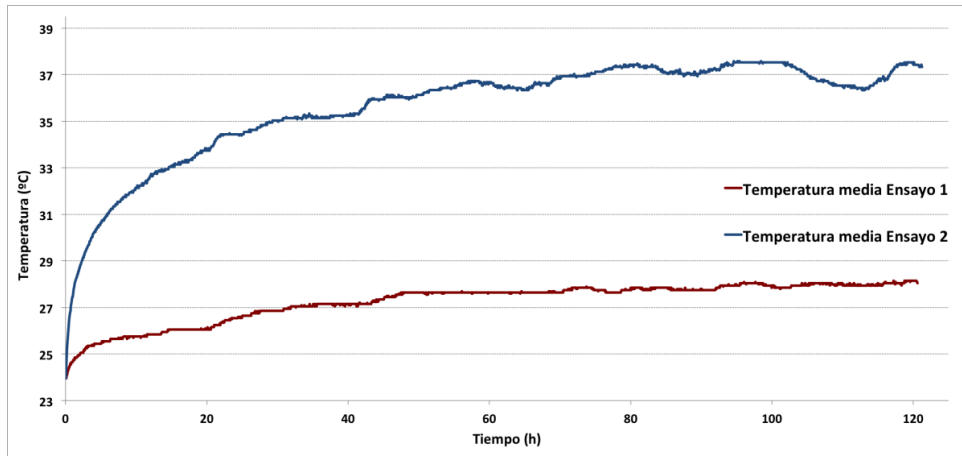


Figura V-19. Registro de datos de la instalación térmica durante los dos ensayos

Realizando el ajuste propuesto por Montero et al (2013), se obtiene la gráfica expuesta en la Figura V-20.

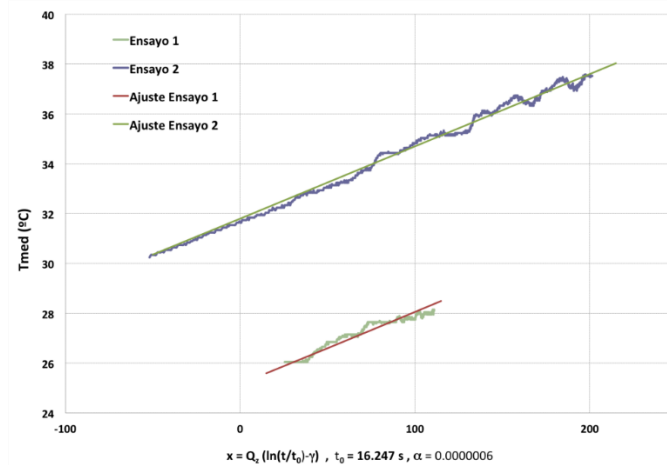


Figura V-20. Aproximación de la temperatura media en el pilote a la ecuación de una recta

Así, se obtienen las siguientes ecuaciones de la recta:

Ensayo 1: $0,029x + 31,7$

Ensayo 2: $0,029x + 25,3$

Nótese que en ambas ecuaciones la pendiente de la recta es la misma, al depender únicamente de la conductividad del terreno. Por otro lado se obtiene:

Ecuación V-20

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

Finalmente, al ser el valor de T_0 el mismo en ambos ensayos, al partir de terreno sin afección térmica:

$$m_1 = T_0 + R_b \cdot Q_{z1} \quad \text{Ecuación V-21}$$

$$m_2 = T_0 + R_b \cdot Q_{z2} \quad \text{Ecuación V-22}$$

$$m_1 - m_2 = R_b \cdot \Delta Q_z \quad \text{Ecuación V-23}$$

En el caso que se estudia se obtiene el siguiente valor de R_b :

$$31,791 - 25,323 = 6,468 = R_b \cdot (79,93 - 41,09)$$

$$R_b = 0,16 \pm 1,8\% \text{ mK/W}$$

Cabe destacar en este punto que el método de la línea infinita suele aplicarse a sondeos geotérmicos cuya profundidad está generalmente en el rango de 50 a 100m. En el presente caso, la profundidad es notablemente más corta y sería interesante estudiar la aplicación de métodos que tienen en cuenta esta “longitud finita”, como los que se describen en Bandos et al. (2009), puesto que podrían tener incidencia sobre el valor de los parámetros de ajuste. También es importante resaltar que, al ser la longitud más corta que en las condiciones habituales, la zona afectada por las condiciones ambientales (los primeros 4 metros de profundidad) tienen una influencia relativa mucho mayor en un pilote de las características estudiadas que en los sondeos geotérmicos al uso. En las curvas se observan con claridad tales efectos en las oscilaciones de temperatura que se producen con regularidad de 24h. Existen técnicas para corregir en cierto modo tales efectos, como los descritos por Bandos et al (2011).

V.3.3 *Determinación experimental*

Durante la perforación del sondeo paralelo a la ubicación del pilote, fue posible obtener el testigo de donde se extrajeron las muestras que fueron identificadas y estudiadas en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Como se describe detalladamente en el

capítulo IV, se realizaron numerosas determinaciones de conductividad térmica de las muestras correspondientes a los diferentes niveles geológicos atravesados, bajo diferentes condiciones de densidad y grado de saturación, mediante el método de la aguja térmica.

Conociendo la potencia o espesor de estos niveles y su grado de saturación, se ha calculado la conductividad térmica media ponderando los valores obtenidos en laboratorio en condiciones experimentales (densidad y grado de saturación) próximas a las que se suponen en la realidad (

Tabla V-3).

Tabla V-3: Datos de conductividad térmica de los niveles identificados y conductividad térmica media calculada

	Niveles	Profundidad Inicial y final (m)	Espesor (m)	λ lab (W/m·K)	λ ponderada
1	Rellenos	0 - 1	1	0,77	0,045
2	Limos arcillosos marrones desecados	1 - 2	1	0,77	0,045
3	Arcillas limosas saturadas	2 – 7,8	5,8	1,611 (sat)	0,550
4	Gravas y arenas	7,8 – 13,8	6	3,267 (sat)	1,153
5	Arcillas limosas de consistencia firme	13,8 - 15	1,2	1,872 (sat)	0,132
4	Gravas y arenas	15 - 17	2	3,267 (sat)	0,384
Longitud del pilote:			17		2,310

De esta forma, la conductividad térmica media del terreno que circunda el pilote resulta ser de $\lambda_{\text{terreno}} = 2,31 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ligeramente inferior al valor propuesto por Badenes (2013) pero coherente y compatible teniendo en cuenta la naturaleza tan diferente de los dos métodos utilizados para su determinación.

Una vez conocido este valor (λ_{terreno}), y el radio de volumen de terreno afectado por el pilote, que fue determinado mediante el modelo de elementos finitos en 3m, es posible calcular la resistencia térmica en condiciones de flujo de calor estacionario mediante la ecuación propuesta por Hellström (1991):

Ecuación V-24

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

Donde:

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

λ es la conductividad térmica del terreno (W/m·K) = 2,31

r_1 es el radio de volumen del terreno asociado al pilote (m) = 3 m

r_b es el radio del pilote (m) = 0,35 cuadrado = 0,32 m pilote cilíndrico de perímetro equivalente

Según esta ecuación, la resistencia térmica del terreno (R_{terreno}) vale **0,10 K/W/m**

Paralelamente, el ensayo de respuesta térmica permite calcular la resistencia térmica del sistema pilote directamente a partir de las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador y la temperatura inicial del pilote antes de iniciarse la inyección de calor.

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

Ecuación V-25

$$T_f - T_{ro}(t) = R \cdot q$$

Donde T_f se puede aproximar a la temperatura media del fluido en el intercambiador, calculada como el promedio de la temperatura del fluido a su entrada y a su salida del sistema geotérmico.

Durante el ensayo de respuesta térmica se inyecta un caudal de fluido a temperatura controlada en el interior del pilote, estableciéndose un flujo de calor estacionario. Tras una trayectoria a lo largo del pilote durante la cual se intercambia calor, el fluido sale del mismo a una temperatura diferente, observándose una proporcionalidad entre la carga térmica inyectada y la pérdida de temperatura. El coeficiente de proporcionalidad es la resistencia térmica del sistema pilote-terreno R (K/(W/m)), definida como la capacidad del sistema de oponerse al flujo del calor:

Ecuación V-26

$$R = \frac{T_f - T_{ro}}{q}$$

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

T_{r0} es la temperatura del terreno en condiciones inalteradas, previa a la inyección de calor. Se puede considerar que es la temperatura a gran distancia del pilote y contra la cual se transfiere el calor. Para determinar este valor se ha extraído de los resultados del modelo de elementos finitos el perfil de temperatura en el terreno a 40 m de distancia del pilote en el momento C_0 , antes de comenzar la inyección de calor. Este perfil se presenta en la Figura V-21. El valor promedio de este perfil térmico es $21,80^{\circ}\text{C}$.

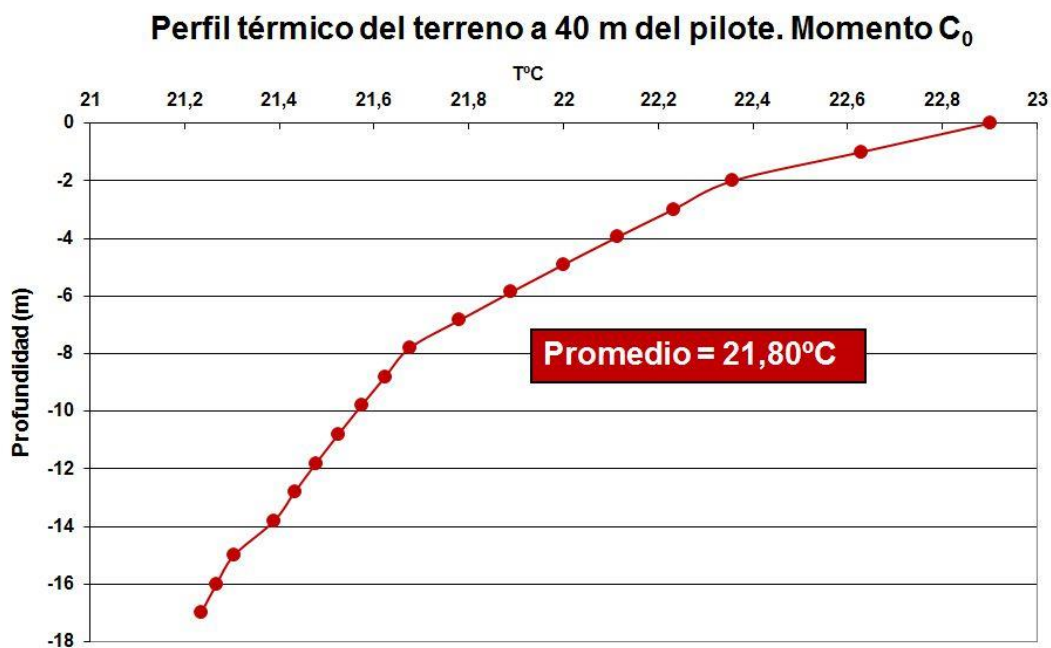


Figura V-21. Perfil térmico del terreno a 40 m de distancia del pilote en el momento C_0

Cabe destacar que las temperaturas de entrada ($26,77^{\circ}\text{C}$) y salida ($25,73^{\circ}\text{C}$) de la sonda geotérmica en el momento C_0 indican una leve inyección de calor previa al inicio del ensayo de respuesta térmica del pilote. Mattsson et al. (2007) lo atribuyen a la electricidad correspondiente a la bomba de circulación del sistema hidráulico geotérmico.

En la Tabla V-4 se muestran los valores de potencia térmica inyectada (q) y temperatura promedio del fluido (Tf) correspondientes a los momentos Ca, Cb y Cc del ensayo C. El valor de T_{r0} es igual en todos los casos (21,80°C). Se calcula el valor de R_{total} para cada uno de estos tres momentos, así como el valor promedio resultante.

Tabla V-4: Datos térmicos de los momentos Ca, Cb y Cc estudiados para la determinación de Rb

	Fecha_hora	Tf Prom	T_{r0} (T°C)	salto térmico $\Delta T^{\circ}C$	q W/m ²	R_{total} K/W/m	
Ca	01/07/2013 12:27	28,14	21,80	6,34	40,00	0,159	0,18
Cb	05/07/2013 12:27	44,42	21,80	22,62	120,00	0,188	
Cc	10/07/2013 0:00	35,38	21,80	13,58	70,00	0,194	

Se determina de esta manera que la resistencia térmica total del sistema pilote-terreno es de 0,18 K/W/m, valor ligeramente superior al valor propuesto por Badenes (2013) pero coherente y compatible teniendo en cuenta la naturaleza tan diferente de los dos métodos utilizados para su determinación.

Por lo tanto, la **resistencia térmica total** (R_T) del conjunto pilote-terreno, definida como la suma de la resistencia térmica del terreno que rodea el pilote ($R_{terreno}$) y la resistencia térmica del pilote termoactivo (R_{pilote}).

Ecuación V-27

$$R_T = R_{pilote} + R_{terreno}$$

$$0,18 \frac{K}{W} / m = 0,10 + R_b \quad 0,19 = 0,29$$

$$R_{pilote} = 0,18 - 0,10 = 0,08 \frac{K}{W} / m$$

En resumen, la determinación de los valores de conductividad térmica de muestras del terreno mediante ensayos de laboratorio ha permitido asignar unas propiedades térmicas a cada uno de los niveles geológicos atravesados. Se ha realizado un modelo sencillo de elementos finitos, a partir de la temperatura ambiental y las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador en el interior del pilote a lo largo del ensayo C. Este modelo ha permitido estimar un radio de influencia aproximado de 3 m de radio alrededor del pilote. A partir de esta distancia, parece que el terreno no queda

afectado por el calentamiento del mismo. Con esta premisa, y considerando una conductividad térmica media del terreno (λ_{terreno}) ponderando los valores de los diferentes niveles geológicos atravesados por el pilote, se ha estimado un valor de resistencia térmica total del sistema (R_{TOTAL}), resultado de la suma de dos componentes: la resistencia térmica del pilote (R_{pilote}) y del terreno afectado por el mismo (R_{terreno}).

Los resultados obtenidos mediante estas primeras estimaciones han resultado ser congruentes y similares a las propuestas por Badenes (2013), calculadas matemáticamente a partir de la teoría de la fuente de calor lineal infinita.

CAPITULO VI
RESULTADOS

VI.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante diferentes ensayos realizados con el fin de caracterizar el comportamiento geotécnico y termo-mecánico del pilote. Previamente a la exposición de los datos, resulta imprescindible aclarar el tratamiento matemático que se le da a los valores brutos obtenidos por los sensores para transformarlos en resultados netos del ensayo. Así mismo, se definen los criterios de signos que se han convenido y seguido a lo largo de toda la experimentación, registro, y tratamiento e interpretación de datos posterior. Por último, dada la amplia información asociada a cada punto experimental de esta tesis, ha sido necesario crear una nomenclatura que mantenga la coherencia en la denominación de éstos. Se define, por tanto, la nomenclatura convenida que se seguirá a lo largo de toda la tesis.

Una vez aclarada esta información preliminar, se exponen los resultados obtenidos en los tres tipos de ensayos realizados al pilote en orden cronológico:

- Dos ensayos de carga estática en el pilote ya hincado, antes de la introducción de calor en el mismo (ensayos A y B).
- Un ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno (ensayo C).
- Un ensayo de simulación de cargas diarias en un edificio de oficinas durante 15 días consecutivos (ensayo E).

En primer lugar, conforme descrito en el Capítulo IV, aprovechando el proceso de hinca, se llevó a cabo un análisis de la capacidad portante del pilote mediante una prueba de carga dinámica con el Analizador Electrónico de Hincado de Pilotes (P.D.A., “Pile Driving Analyzer”). Este ensayo permite medir las tensiones y compresiones máximas provocadas por los impactos del martillo durante la hinca, además de registrar las distintas capacidades portantes movilizadas, gracias a los acelerómetros y extensómetros instalados previamente en el pilote.

Una vez hincado el pilote, se realizaron dos ensayos de carga estática con el fin de analizar la capacidad portante del pilote mediante un método alternativo al primero y obtener la distribución de la tensión con la profundidad. Como resultado de estos ensayos, se muestra la evolución con el tiempo de los movimientos en cabeza del

pilote, así como los perfiles de deformación, tensión, cargas internas y cargas transmitidas al terreno a través del fuste.

Seguidamente, con el pilote sometido a una carga mecánica vertical de 1.000 kN en cabeza, se realizó un ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno (ensayo C). Los sensores instalados en el seno del pilote permiten determinar la evolución con el tiempo de los perfiles de temperatura, movimientos en cabeza del pilote, deformaciones, tensiones, cargas internas y cargas transmitidas al terreno a través del fuste como respuesta a la inyección de una secuencia de potencias térmicas controladas.

Por último, se muestran los datos registrados durante el ensayo de simulación de cargas diarias de un edificio de oficinas durante 15 días consecutivos en modo refrigeración (ensayo E). Los resultados de este ensayo se han estructurado en dos bloques. En primer lugar se analizan en detalle todos los puntos de uno de los ciclos representativos de la serie de 15 realizados: el ciclo segundo. Seguidamente, se analizan los 15 ciclos completos del ensayo. En ambos bloques se sigue el mismo orden de exposición de resultados de los casos anteriores: evolución de las temperaturas en el interior del pilote, movimientos en cabeza, incremento de las deformaciones, tensiones, cargas internas y cargas transmitidas al terreno a través del fuste.

VI.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

VI.2.1 Datos brutos: Tipos de deformación en el pilote

Los numerosos sensores que se encuentran embebidos en el seno del hormigón del pilote permiten medir y registrar el comportamiento termo-mecánico del mismo en términos de temperaturas, tensiones, deformaciones y desplazamientos. Sin embargo, para poder realizar una correcta interpretación de los datos que arroja la instrumentación instalada, es fundamental diferenciar conceptos como deformación observada, deformación libre térmica y deformación no desarrollada (Figura VI-1).

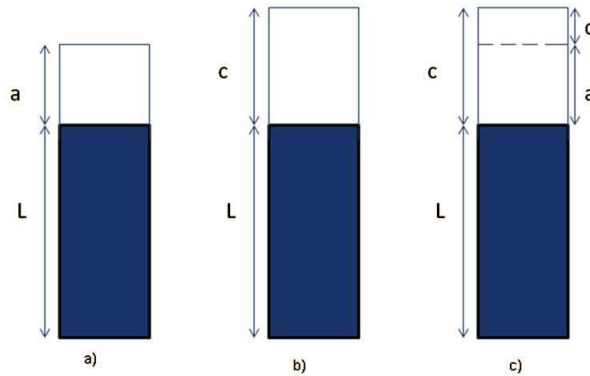


Figura VI-1. a) Deformación observada (a); b) Deformación térmica libre (c); c) Deformación no desarrollada (d)

a) **Deformación observada** ($\epsilon_{obs}=a/L$): es la que se obtiene de forma directa del extensómetro y representa la deformación que sufre el pilote en las condiciones reales en las que se encuentra, incluyendo el movimiento constreñido por la fricción con el terreno circundante por fuste y, en su caso, por la limitación de deformación en sus extremos.

b) **Deformación térmica libre** ($\epsilon_{th L}=c/L$): es la deformación térmica que sufriría teóricamente el pilote como resultado de un cambio de temperatura si no se encontrara constreñido en sus movimientos y deformaciones.

c) **Deformación no desarrollada** ($\epsilon_{no\ desarrollado} = d/L$): El tramo “d” es la deformación no desarrollada en el pilote al aplicar las cargas térmicas, por encontrarse constreñido por el terreno. Es la diferencia de deformación entre el caso b y el a. Esta deformación corresponde por tanto a la parte de deformación térmica libre que no se produce, sino que se transforma en una acción mecánica, con el consecuente desarrollo de tensiones verticales en el interior del pilote.

Uno de los principales objetivos de los ensayos termo-mecánicos que se desarrollan en este capítulo es la obtención del valor de la deformación no desarrollada, que es la que genera tensiones internas de origen térmico en el pilote. La necesidad de identificar y cuantificar esta deformación no desarrollada debido a cargas térmicas radica en la importancia de su influencia en el comportamiento estructural del pilote. En caso de que esta influencia resultara significativa, la deformación no desarrollada debida a cargas térmicas debe ser tomada en consideración en el diseño y dimensionamiento estructural del pilote.

VI.2.2 *Criterio de signos convenido*

El criterio de signos convenido en la interpretación de datos de instrumentación y la elaboración de este estudio ha sido el que se muestra en la Tabla VI-1: tanto en extensómetros como en sensores de fibra óptica, el signo negativo implica esfuerzos/deformaciones de tipo compresivo, mientras que el signo positivo corresponde a esfuerzos/deformaciones de tracción o estiramiento. En el caso de los LVDT's y flexímetros, que registran los movimientos verticales de la cabeza del pilote, los datos negativos indican un descenso mientras que los números positivos describen movimientos ascendentes.

Tabla VI-1. Criterio de signos seguido en esta tesis

	+	-
Extensómetros	Tracción	Compresión
Fibra óptica	Tracción	Compresión
LVDT's	Movimiento ascendente	Movimiento descendente
Flexímetros	Movimiento ascendente	Movimiento descendente

VI.2.3 *Nomenclatura de los ensayos y puntos de ensayo específicos*

Dada la extensa información asociada a cada punto experimental de esta tesis, se ha convenido la siguiente nomenclatura:

Ensayos A y B de carga estática a temperatura constante. Se utiliza la siguiente secuencia de caracteres: **CICLO / RAMA / PUNTO DEL CICLO/ CARGA**

- **Ciclo:** Indica el número del ciclo del correspondiente ensayo (1 a 5 en el ensayo A; 1 a 3 en el ensayo B)
- **Rama:** CC corresponde a la rama de carga y CD a la rama de descarga de cada ciclo.
- **Punto del ciclo:** Sólo en el ciclo 4 del ensayo A, de mayor duración, se distinguen dos puntos a y b, al principio y final del escalón de carga
- **Carga:** Se indica el escalón de carga, con su valor en kN

Ensayo de respuesta térmica. Se utiliza una secuencia de cuatro caracteres que describe por orden: el ensayo, el ciclo y el punto del ciclo que ha generado el punto experimental y el tipo de sensor que lo ha registrado, de la siguiente forma:

ENSAYO / CICLO / PUNTO DE CICLO / TIPO DE SENSOR

- **ENSAYO:**
 - El ensayo C es la prueba de caracterización térmica del sistema pilote-terreno. Se realizó un único ciclo de carga térmica con carga mecánica constante de 1000 kN.
 - El ensayo E es una secuencia de 15 ciclos térmicos consecutivos, también bajo carga mecánica constante de 1000 kN.
- **CICLO:** En el ensayo C se realizó un único ciclo de cargas térmicas. Por el contrario, el análisis de los datos del ensayo E, consistente en una secuencia de 15 ciclos, precisa de la definición exacta del número del ciclo que está siendo analizado.
- **PUNTO del CICLO:** Se han identificado dentro de cada ciclo una serie de momentos específicos fácilmente identificables, con el fin de permitir la comparación del estado tenso-deformacional del pilote en diferentes ensayos y ciclos. Estos puntos han sido denominados a, b, c, d, e y f respectivamente, y su significado se describe al inicio del ensayo correspondiente.

VI.3 PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA: ENSAYOS A Y B

La prueba de carga estática presenta dos objetivos fundamentalmente: determinar la capacidad portante del pilote y la distribución de tensiones con la profundidad. Se realizaron dos pruebas de carga estática, identificadas como ensayos A y B respectivamente. Se exponen a continuación los resultados obtenidos en cada una de ellas.

VI.3.1 Primera prueba de carga estática. ENSAYO A

El primer ensayo de carga estática se realizó entre el 15 y 16 de enero de 2013. La carga se aplicó mediante una célula de carga de 120 t (1200 kN) que actuaba contra un bastidor sujeto al terreno a través de 3 anclajes como elementos de reacción (Figura VI-2). El diseño de este sistema de aplicación de cargas mecánicas se describe en el capítulo IV de esta tesis.



Figura VI-2. Sistema de aplicación de cargas y detalle de la célula de carga de 120 t

La instrumentación instalada en el interior del pilote permitió detectar y registrar deformaciones y tensiones generadas a lo largo del ensayo como consecuencia de la aplicación de los diferentes escalones de carga. Durante este ensayo los sensores de fibra óptica se salieron de rango, lo que impidió obtener valores de éstos. Tras la finalización del ensayo A, se solventó este problema y se realizó una segunda prueba de carga estática (ensayo B) para garantizar el correcto funcionamiento de estos sensores.

VI.3.1.1 Carga mecánica aplicada

El ensayo A se inició el día 15 de enero a las 20:40 horas. Durante 24 horas se aplicaron 5 ciclos de carga (1C a 5 C), siguiendo el esquema mostrado en la Figura VI-3.

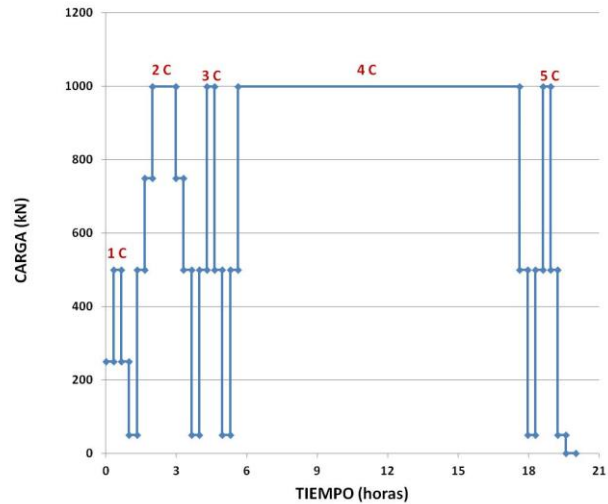


Figura VI-3. Secuencia de escalones de carga del ensayo A

VI.3.1.2 Carga medida en la cabeza del pilote

La Figura VI-4 muestra la variación de carga medida por la célula de carga en la cabeza del pilote durante el ensayo A. La secuencia registrada es igual a la de cargas aplicadas, lo que confirma la correcta ejecución del ensayo.

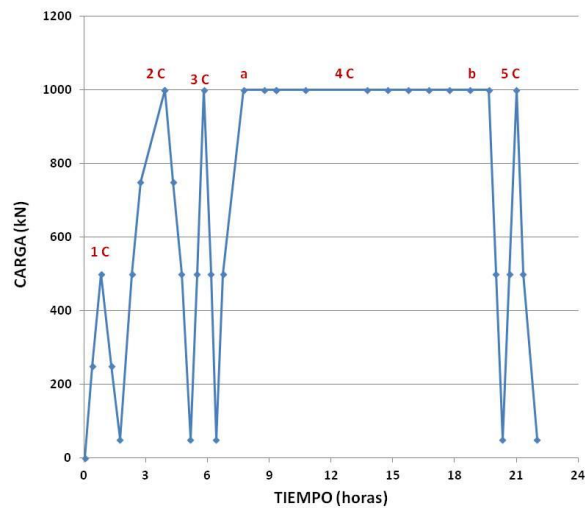


Figura VI-4. Carga medida en cabeza de pilote durante el ensayo A

VI.3.1.3 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Durante el ensayo A se midieron los movimientos horizontales y verticales en la cabeza del pilote mediante lectura manual de los valores obtenidos en flexímetros y LVDT's, dispuestos como se muestra en la Figura VI-5. Tal como se describe en el apartado VI.2.2 de esta tesis "Criterio de signos convenido", el movimiento vertical

descendente de los sensores se describe con signo negativo. En caso de detectarse un levantamiento del pilote se toma como positivo. Los movimientos horizontales se consideran positivos en el sentido de las flechas que identifican los ejes x e y en la Figura VI-5

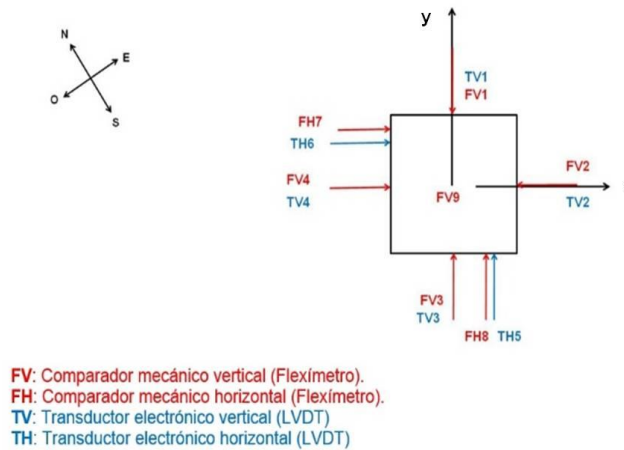


Figura VI-5. Disposición de los sensores en la cabeza del pilote durante el ensayo A

Movimientos verticales

Como se observa en la Figura VI-5, el sensor identificado como **FV9** es un flexímetro instalado sobre el bastidor en el centro geométrico del pilote. Este sensor permite observar la evolución de los asientos del propio bastidor a medida que se desarrolla el ensayo A (Figura VI-6).

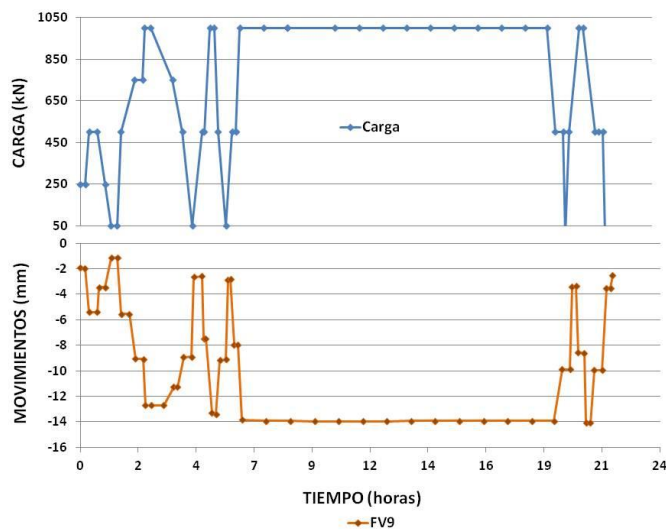


Figura VI-6. Movimientos verticales medidos por el flexímetro sobre el bastidor (FV 9)

Se observa que, al aplicar el escalón de máxima carga, 1000 kN, el bastidor sufre un desplazamiento vertical hacia abajo de 14 mm

Se muestran en las Figura VI-7 y Figura VI-8 los movimientos verticales detectados por los dos tipos de sensores utilizados: LVDT's y flexímetros. Con el objeto de facilitar la comprensión de las figuras, se ha incorporado en ambos casos la variación de carga registrada por la célula de carga situada en cabeza de pilote.

Se observa que, en términos generales, la cabeza del pilote ha descendido entre 7 y 9 mm durante la fase de máxima carga aplicada del ensayo A. Los resultados obtenidos mediante los relojes comparadores y los LVDT son muy parecidos, siendo los asientos detectados por los relojes ligeramente inferiores a los electrónicos (LVDT) con una diferencia del orden de 1 mm.

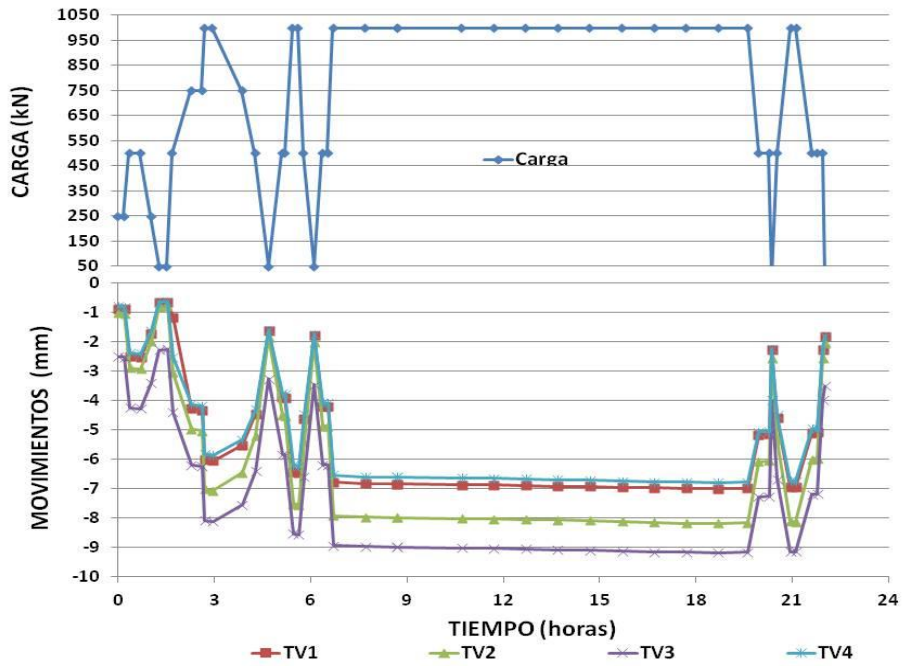


Figura VI-7. Movimientos verticales registrados durante el ensayo A (LVDT's)

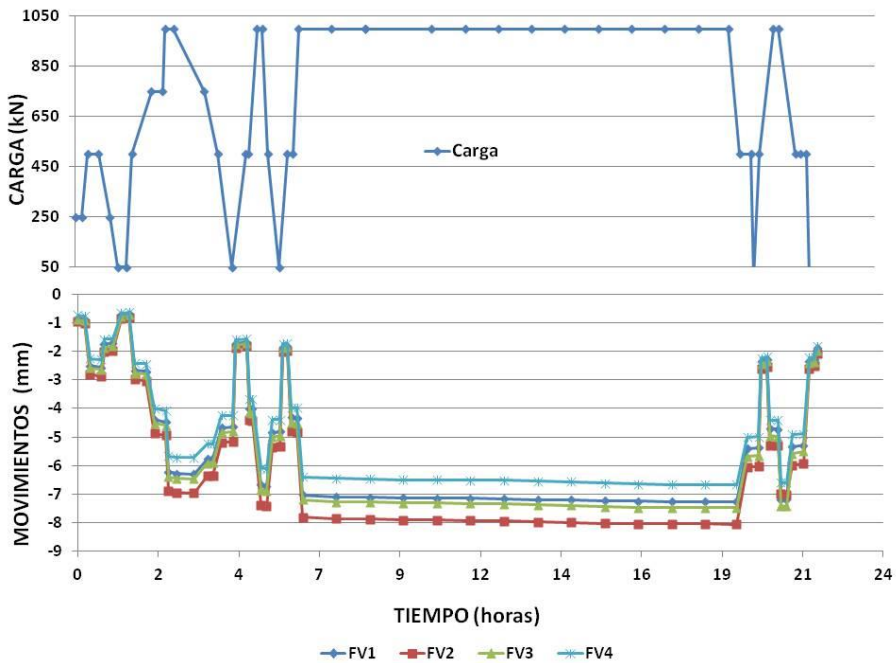


Figura VI-8. Movimientos verticales registrados durante el ensayo A (flexímetros)

Movimientos horizontales

Las medidas registradas por los LVDT's (Figura VI-9) y los flexímetros (Figura VI-10) muestran que, ante la aplicación de una carga vertical, el pilote sufre desplazamientos horizontales. Estos desplazamientos son coherentes entre sí, tanto en respuesta temporal inmediata a las cargas verticales aplicadas, como en la simetría de las curvas obtenidas. Los sensores TH6 y FH7 se mueven en sentido negativo del eje x mientras que los sensores FH8 y TH5 se mueven en sentido positivo del eje y. El orden de magnitud del desplazamiento horizontal registrado por cada uno de estos sensores no supera los 2,5 mm.

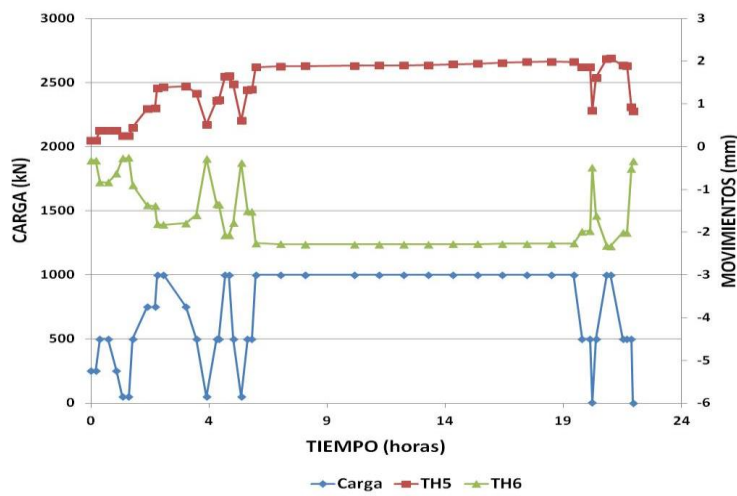


Figura VI-9. Movimientos horizontales en cabeza durante el ensayo A (LVDT's)

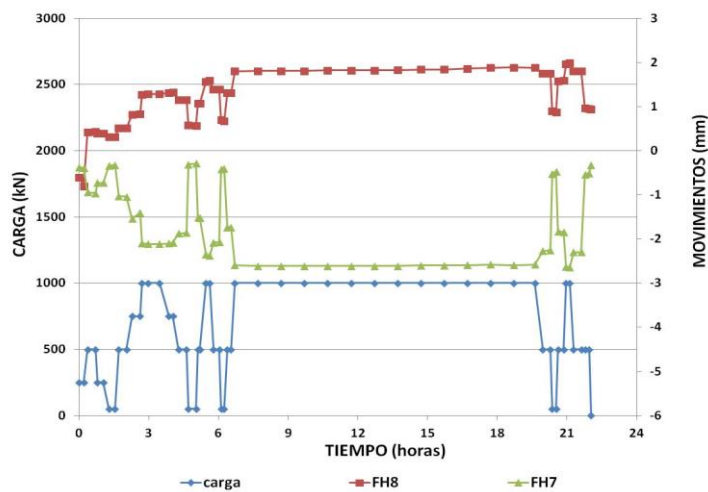


Figura VI-10. Movimientos horizontales en cabeza durante el ensayo A (flexímetros)

VI.3.1.4 Deformaciones medidas en el interior del pilote

En este ensayo sólo se obtuvieron resultados válidos de deformaciones en el interior del pilote a partir de los extensómetros, ya que los sensores de fibra óptica se salieron de rango. Se muestran a continuación las curvas de variación de deformación con la profundidad en el interior del pilote durante los cinco ciclos de carga y descarga del ensayo (Figura VI-11), registrados el día 15 de enero de 2013. Los puntos representados corresponden a los valores promedio de las lecturas efectuadas en pares de sensores instalados diametralmente opuestos a determinadas profundidades. Se distinguen en esta figura las curvas correspondientes a los diferentes escalones de carga (CC) y de descarga (CD) de los cinco ciclos de este ensayo (Figura VI-3). La deformación máxima, 300 $\mu\text{m}/\text{m}$, se produce en el interior del pilote a los 10 metros de profundidad cuando se le aplica una carga de 1000 kN en cabeza.

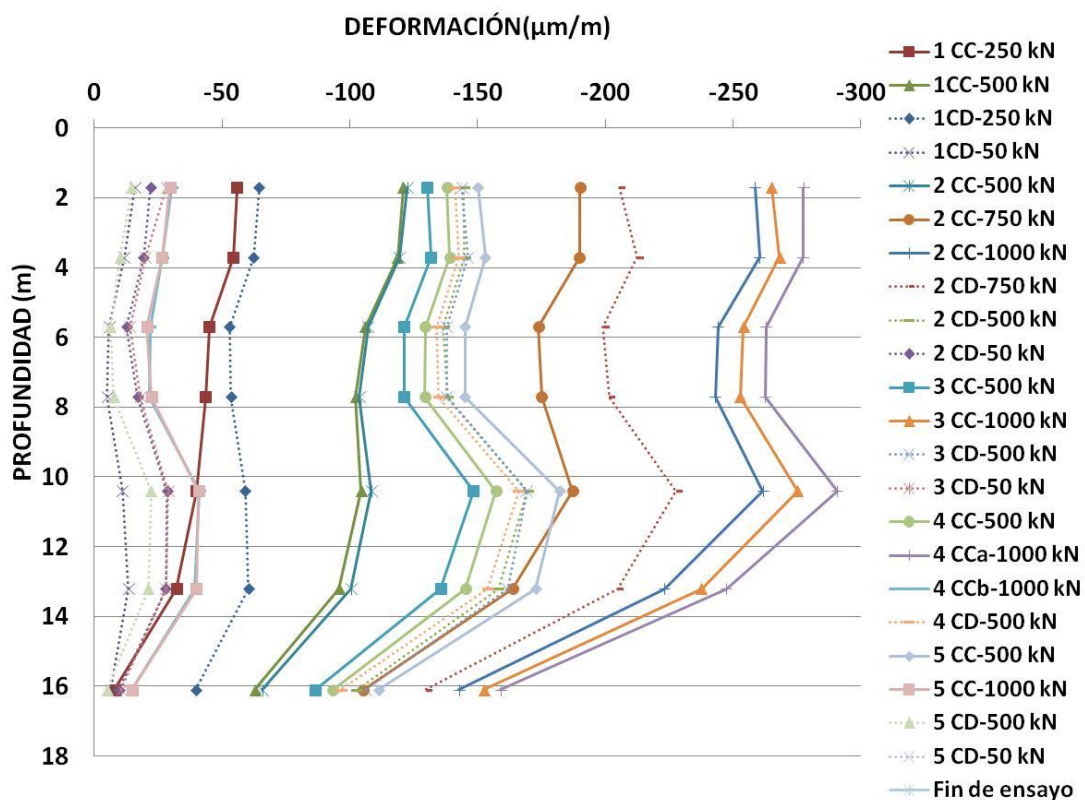


Figura VI-11. Variación de la deformación con la profundidad en el interior del pilote durante los cinco ciclos del ensayo A. CC: escalón de carga; CD: escalón de descarga

Con el fin de facilitar la comprensión de los resultados, se representan a continuación, por separado, las curvas de distribución de deformación con la profundidad en el interior del pilote correspondientes a los cinco ciclos (Figura VI-12 a Figura VI-16). En el ciclo 4 se mantuvo la carga de 1000 kN durante 10 horas por lo que se representa en la figuras las deformaciones al inicio (punto a) y al final (punto b) de ese escalón.

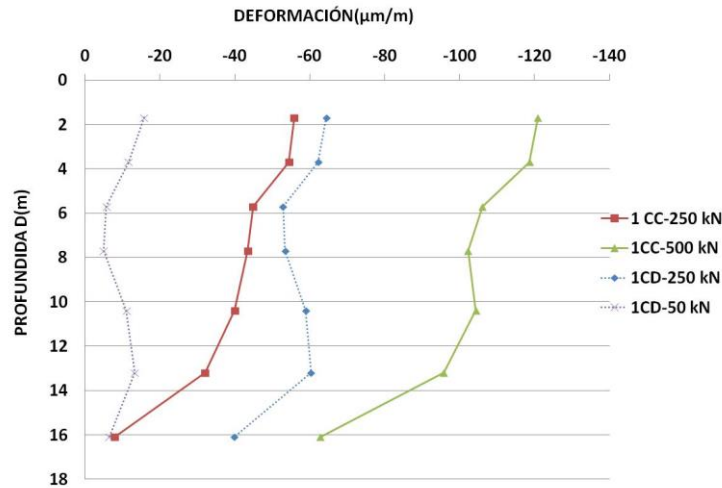


Figura VI-12. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 1

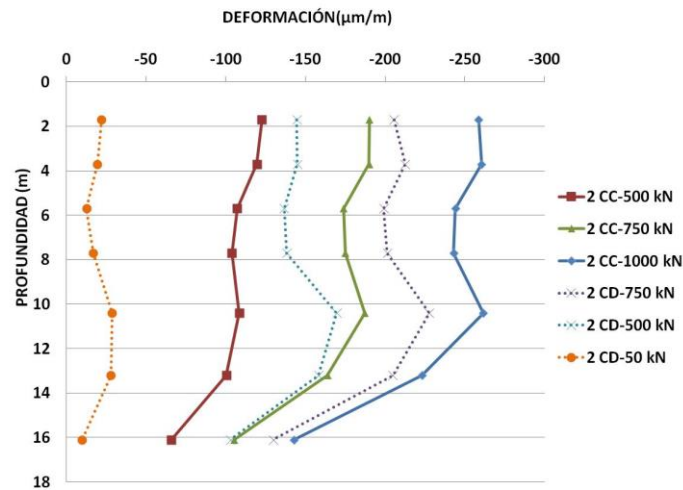


Figura VI-13. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 2

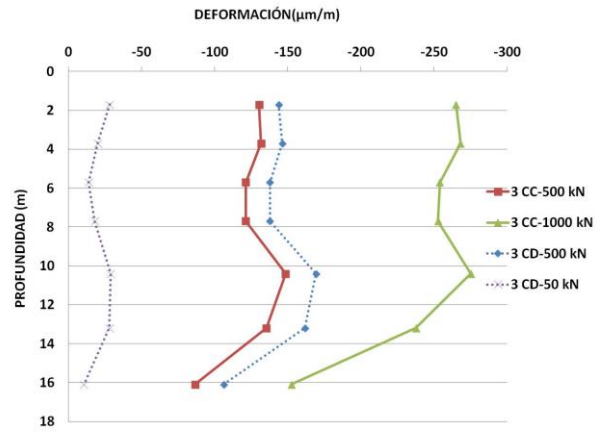


Figura VI-14. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 3

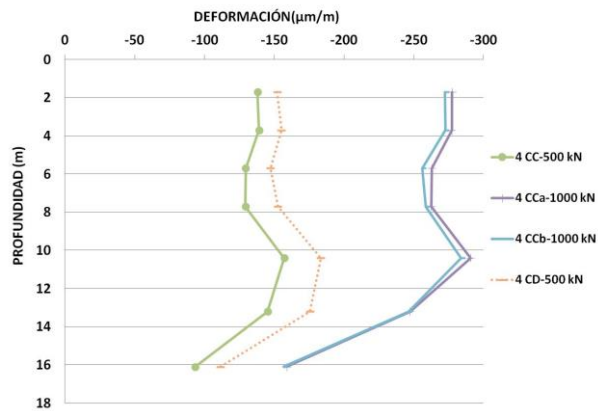


Figura VI-15. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 4

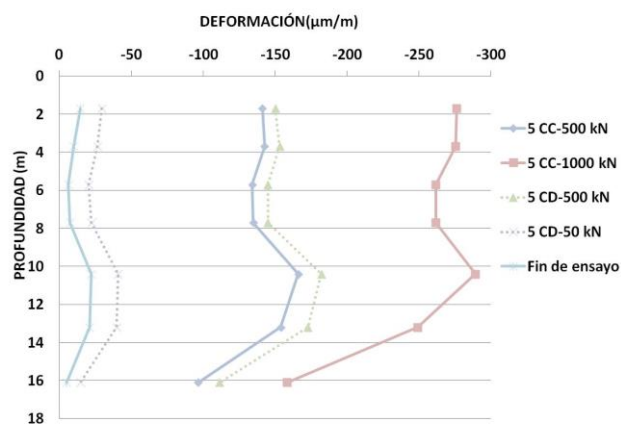


Figura VI-16. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 5

VI.3.1.5 Tensiones en el interior del pilote

La aplicación de carga mecánica genera tensiones en el interior del pilote. Estas tensiones (σ), expresadas en kN/m^2 , se calculan de forma inmediata a partir de las medidas de deformación (ϵ), obtenidas por los extensómetros, y el módulo de elasticidad (E) del pilote, proporcionado por el fabricante (GRK).

Ecuación VI-1

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Donde:

σ es la tensión media de la sección a la profundidad correspondiente (kN/m^2)

E es el módulo de elasticidad del pilote ($313.142,7 \text{ MN/m}^2$)

ϵ es la deformación media de las lecturas de los dos sensores situados a la profundidad correspondiente y opuestos diametralmente ($\mu\text{m/m}$).

Se muestran a continuación las curvas de variación de tensión con la profundidad en el interior del pilote durante los cinco ciclos de carga y descarga del ensayo (Figura VI-17). De igual forma que en el apartado anterior, se distinguen en la figura los ciclos de carga (CC) de los ciclos de descarga (CD).

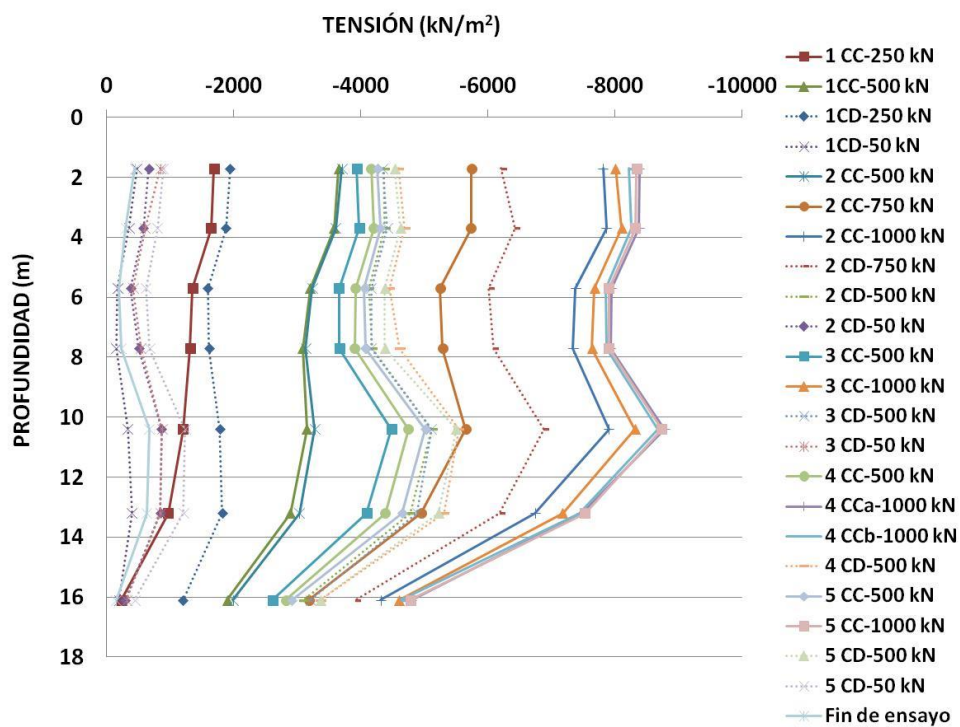


Figura VI-17. Evolución de las tensiones en el interior del pilote durante el ensayo A.

VI.3.1.6 Cargas axiales en el Pilote

El valor de las tensiones generadas durante el ensayo A, expuestas en el apartado anterior, se considera el promedio que actúa sobre toda la superficie de la sección del pilote. Matemáticamente se puede expresar en términos de carga, como producto de la tensión por el área del pilote, que es constante y conocida, de la siguiente manera:

Ecuación VI-2

$$N = \sigma \cdot S$$

Dónde:

N es la carga axial (kN)

σ es la tensión media en la sección correspondiente (kN/m²)

S es la superficie del pilote ($S = 0,35 \times 0,35 = 0,1225 \text{ m}^2$)

De esta forma, se determinan las curvas de variación de carga con la profundidad en el interior del pilote correspondientes a todos los ciclos de carga (CC) y descarga (CD) del ensayo A (Figura VI-18).

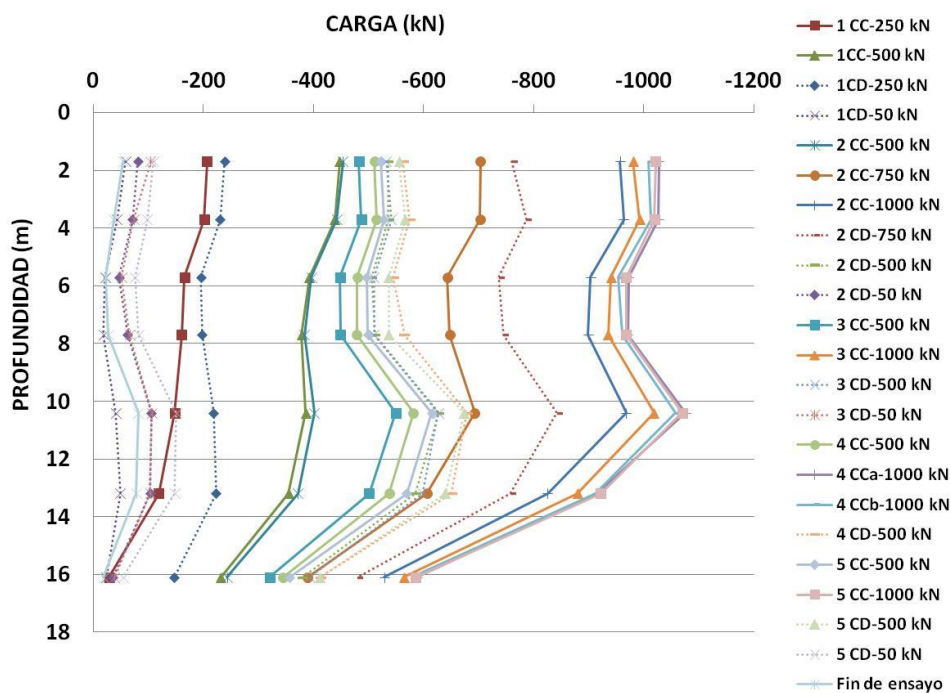


Figura VI-18. Evolución del perfil carga con la profundidad durante el ensayo A.

VI.3.2 Segunda prueba de carga estática. ENSAYO B

El 29 de mayo de 2013 se realizó un segundo ensayo de carga estática reducido, de sólo cinco horas de duración. El objetivo de este ensayo B era obtener lecturas de ambos tipos de sensores de forma automática, extensómetros y fibra óptica, que permitiesen su comparación y validación antes del inicio de las pruebas térmicas. Tras la finalización de este ensayo la carga en cabeza del pilote se mantuvo constante en 1000 kN hasta la finalización de todo el estudio experimental.

VI.3.2.1 Carga mecánica aplicada

En la Figura VI-19 se representan los ciclos de carga aplicados durante el ensayo B, de 5 horas de duración.

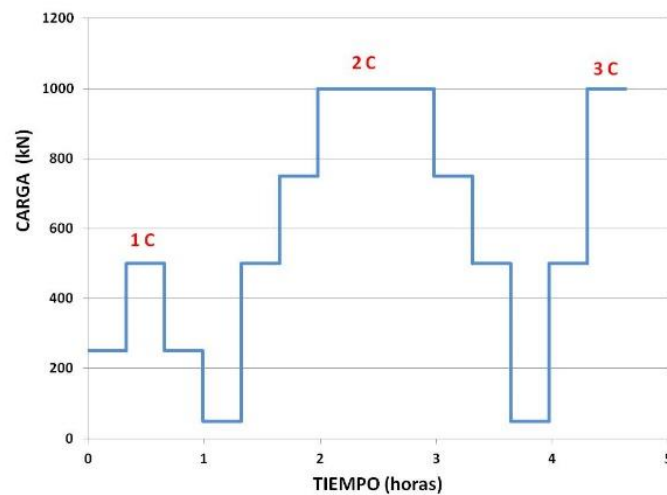


Figura VI-19. Secuencia de escalones de carga del ensayo B

VI.3.2.2 Carga medida en la cabeza del pilote

La Figura VI-20 muestra la variación de carga medida por la célula de carga en la cabeza del pilote durante el ensayo B. La secuencia registrada es igual a la de cargas aplicadas, lo que confirma la correcta ejecución del ensayo.

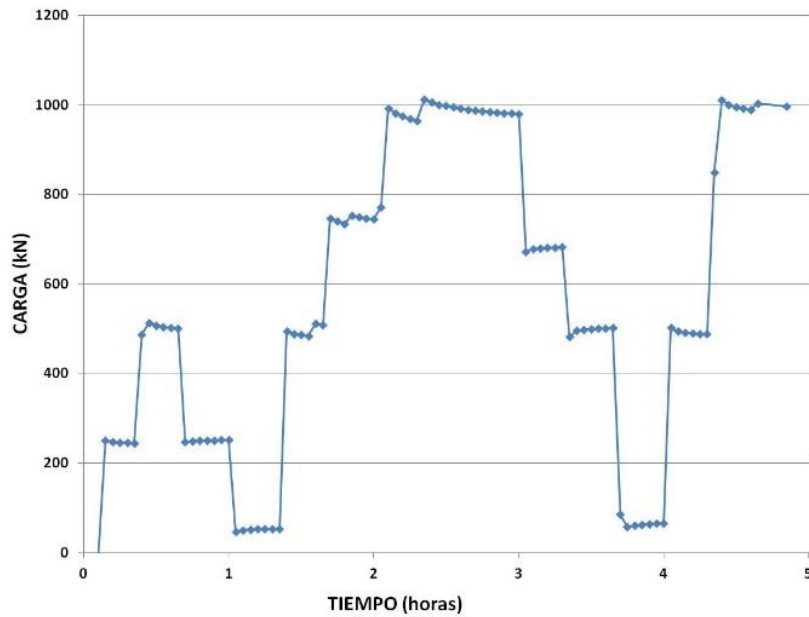


Figura VI-20. Carga medida en cabeza de pilote durante el ensayo B

VI.3.2.3 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Tras la realización del primer ensayo de carga estática se desmontó toda la instrumentación externa del pilote con el fin de evitar deterioros de ésta por las inclemencias del tiempo. Antes de la realización del ensayo B se volvió a disponer la instrumentación externa del pilote. En este segundo ensayo de carga estática no se emplearon flexímetros para medir los movimientos verticales y horizontales en cabeza. Los datos se obtuvieron a través de un registro continuo de los LVDTs. Los sensores 1, 3, 5 y 6 son sensores verticales mientras que los 2 y el 4 son sensores horizontales (Figura VI-21):

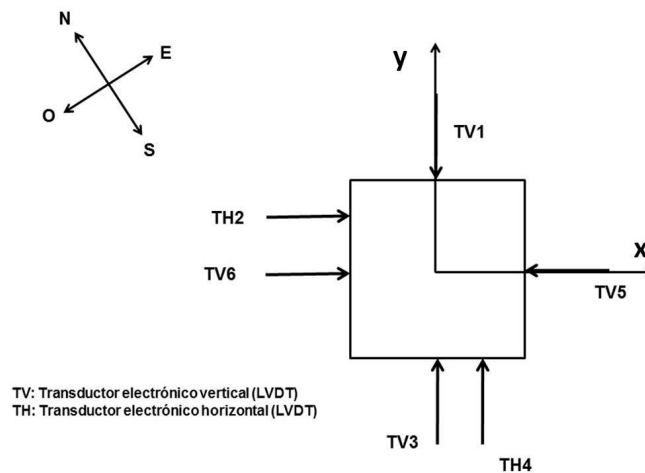


Figura VI-21. Identificación de LVDT's en la cabeza del pilote. Ensayo B

Movimientos verticales

El máximo movimiento vertical que se produce en el pilote durante el segundo ensayo de carga estática fue del orden de 5 - 6 mm en los cuatro sensores (Figura VI-22). La evolución de los movimientos verticales refleja la aplicación de las cargas en los diferentes ciclos del ensayo.

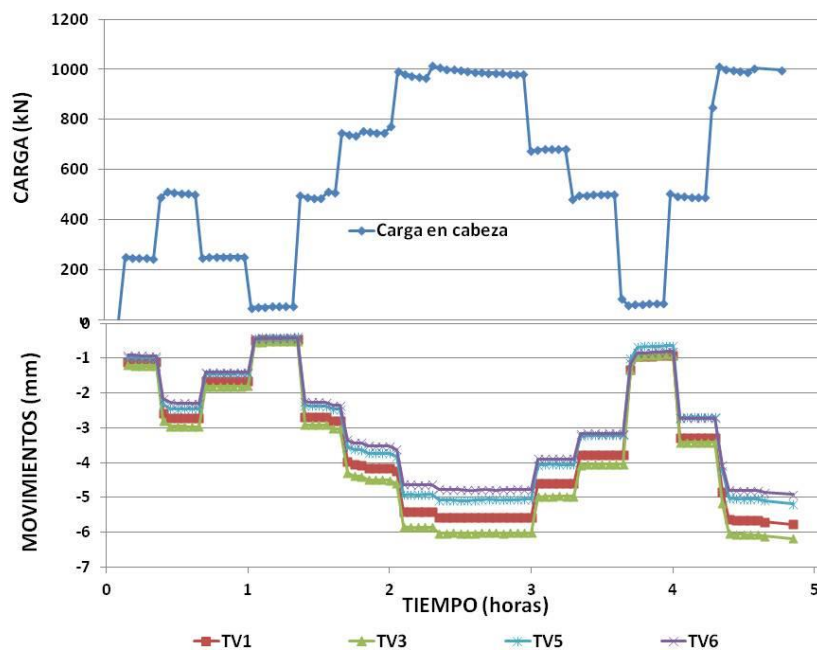


Figura VI-22. Movimientos verticales de cabeza medidos mediante LVDT's. Ensayo B

Movimientos horizontales

En la Figura VI-23 se presenta el movimiento horizontal que experimenta la cabeza del pilote durante el ensayo B. Este movimiento alcanza un máximo de alrededor de +2 mm medido por el sensor TH2 y de aproximadamente -2,8 mm medido por el TH4 durante la aplicación de la carga máxima en cabeza (1000 kN). El resultado de estos dos movimientos simultáneos y combinados indica un cabeceo de la cabeza del pilote, que se desplaza, mínimamente, hacia el sur-sudeste.

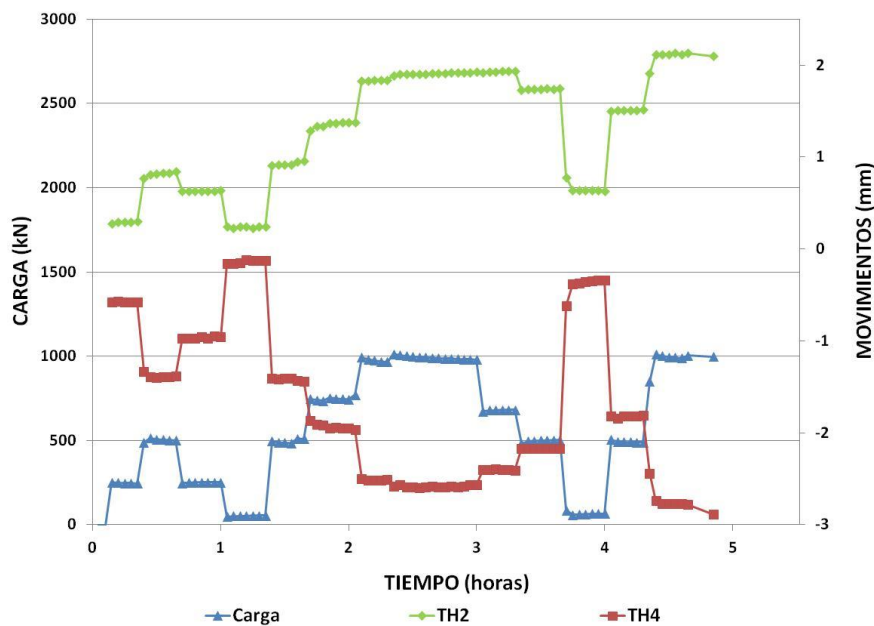


Figura VI-23. Movimientos horizontales en cabeza medidos mediante LVDT's. Ensayo B

VI.3.2.4 Deformaciones medidas en el interior del pilote

Se representan a continuación las deformaciones medidas en el interior del pilote durante el ensayo B, obtenidas a partir de las lecturas de los extensómetros (Figura VI-24) y fibra óptica (Figura VI-25). El máximo valor de deformación registrado con ambas instrumentaciones es de $-280 \mu\text{m/m}$ (compresión) bajo una carga de 1000 kN. En el caso de los extensómetros esta deformación máxima se mantiene en los 10 primeros metros. Los sensores de fibra óptica mantienen esta tendencia hasta los 12 metros de profundidad. Esta diferencia se debe a las posiciones de los sensores. Entre los 10 y 13 metros no existe extensómetro, mientras que sí se dispone de un sensor de fibra óptica a 12 metros de profundidad.

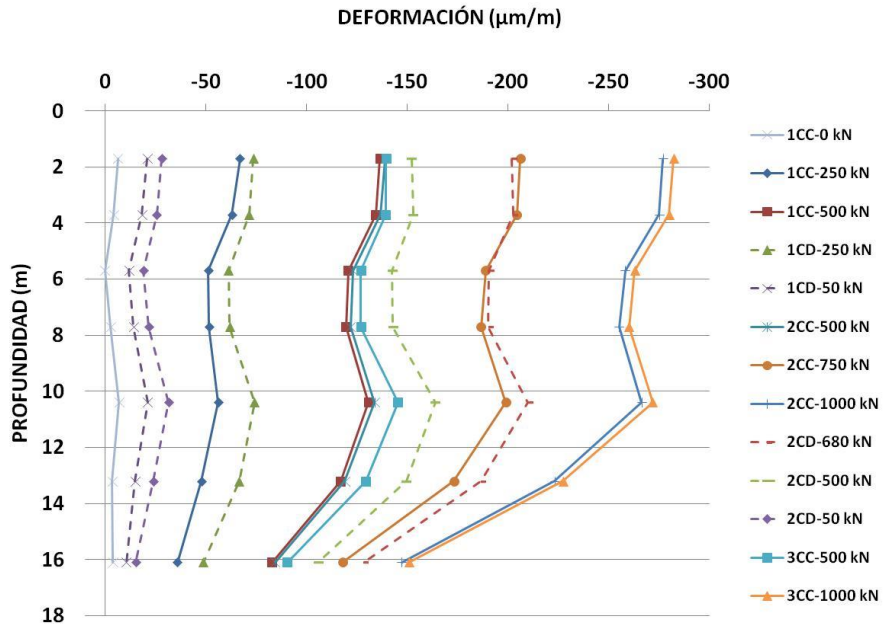


Figura VI-24. Evolución de las deformaciones en el interior del pilote. Ensayo B (Extensómetros)

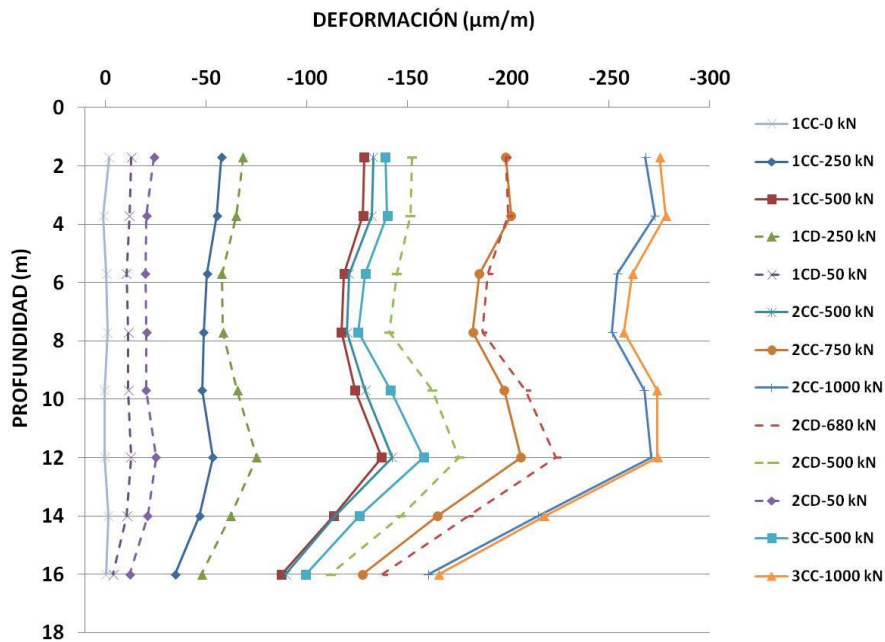


Figura VI-25. Evolución de las deformaciones en el interior del pilote. Ensayo B (Fibra óptica)

VI.3.2.5 Tensiones en el interior del pilote

La aplicación de carga mecánica genera tensiones en el interior del pilote. Estas tensiones (σ), expresadas en kN/m^2 , se calculan de forma inmediata a partir de las medidas de deformación (ϵ), obtenidas por los extensómetros, y el módulo de elasticidad (E) del pilote, mediante la Ecuación VI-1 (página 241). Se muestran a continuación las curvas de distribución de tensión con la profundidad correspondientes a los distintos ciclos, y en las ramas de carga (CC) y descarga (CD) del ensayo B, obtenidas a partir de las medidas de extensómetros (Figura VI-26) y fibra óptica (Figura VI-27).

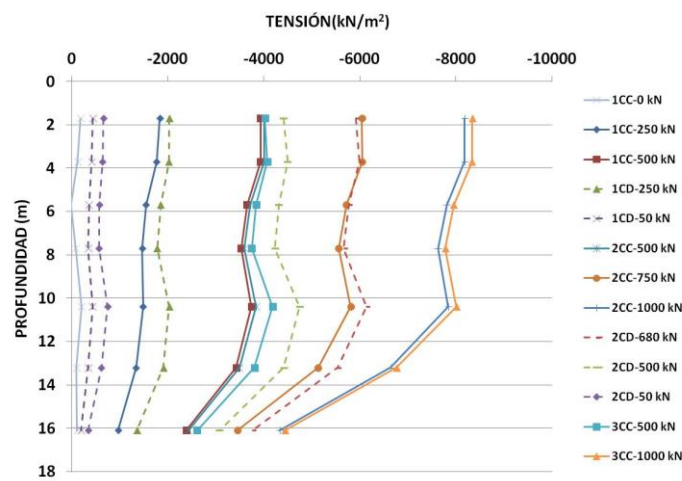


Figura VI-26. Evolución de las curvas tensión-profundidad a lo largo del ensayo B (Extensómetros)

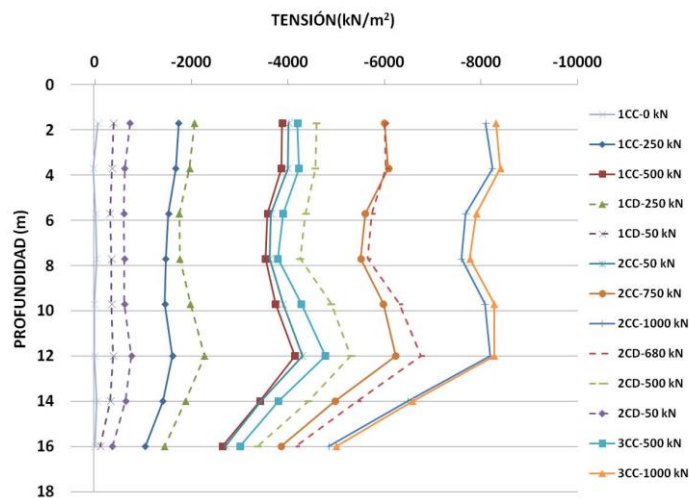


Figura VI-27. Evolución de las curvas tensión-profundidad a lo largo del ensayo B (Fibra óptica)

VI.3.2.6 Cargas axiales en el pilote

El valor de las tensiones generadas durante el ensayo B, expuestas en el apartado anterior, se considera la media actuando sobre toda la superficie de la sección del pilote. Se puede expresar matemáticamente en términos de carga, como producto de la tensión por el área del pilote, que es constante y conocida, de la siguiente manera:

Ecuación VI-3

$$N = \sigma \cdot S$$

Dónde:

N es la carga axial (kN)

σ es la tensión media en la sección correspondiente (kN/m²)

S es la superficie del pilote ($S = 0,35 \times 0,35 = 0,1225 \text{ m}^2$)

A continuación, se representa la evolución de las curvas de distribución de carga axial con la profundidad a lo largo del ensayo B, obtenidas a partir de los extensómetros (Figura VI-28) y los sensores de fibra óptica (Figura VI-29).

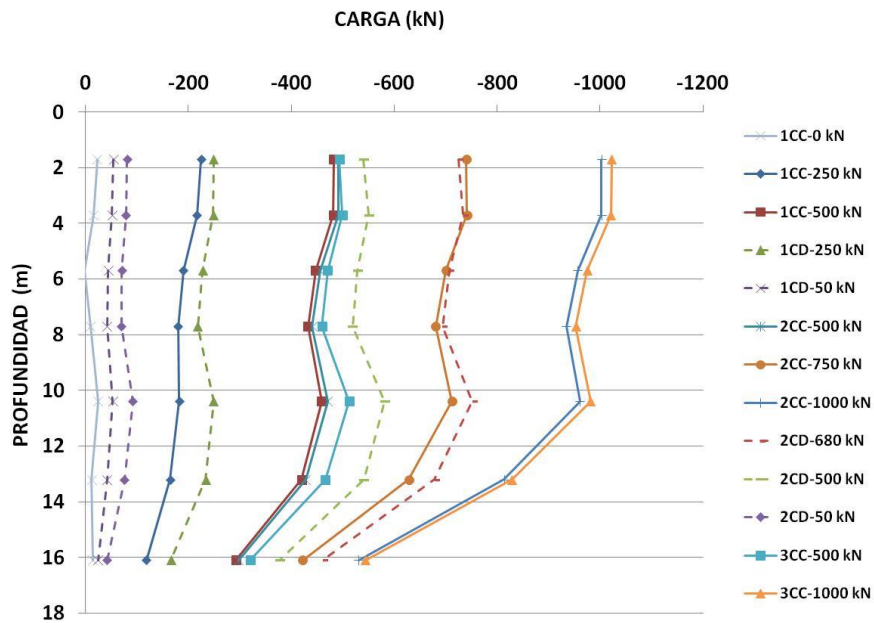


Figura VI-28: Evolución de las curvas carga-profundidad a lo largo del ensayo B (extensómetros)

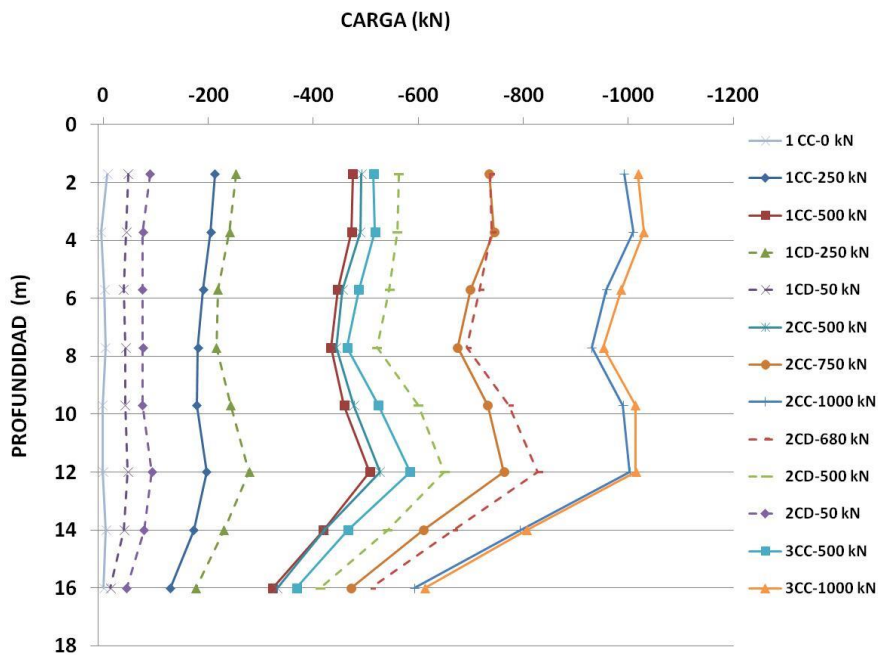


Figura VI-29: Evolución de las curvas carga-profundidad a lo largo del ensayo B (fibra óptica)

VI.4 ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DEL PILOTE: ENSAYO C

Se realizó un primer ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno entre los días 26/6/2013 y 10/7/2013, siguiendo las fases descritas en la Tabla VI-2. Las distintas fases corresponden a la inyección de calor mediante diferentes escalones de potencia, simulando un funcionamiento geotérmico en modo refrigeración. En todos los casos se hizo circular agua de la red con un caudal de 0,6 m³/h. Durante todo el ensayo C el pilote estuvo sometido a la acción de la carga mecánica constante de 1000 kN.

Tabla VI-2: Condiciones experimentales del ensayo C

<i>Fases del ensayo</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Salto térmico</i>	<i>Potencia inyectada (W)</i>	<i>Razón de potencia (W/m)</i>
Fase 1	Inicio: 26/6/2013	11:09	1°C	700	40
	Fin: 01/7/2013	11:06			
Fase 2	Inicio: 01/7/2013	12:33	3°C	2.100	120
	Fin: 05/7/2013	11:12			
Fase 3	Inicio: 05/7/2013	12:03	1,5°C	1.050	60
	Fin: 10/7/2013	13:30			

Se identifican a lo largo del ensayo una serie de puntos estratégicos, definidos en la Tabla VI-3 y Figura VI-30. En primer lugar, una lectura inicial C0 el día 26/06/2013 antes de comenzar la inyección de calor. Los puntos a, b, c y d corresponden al final de cada escalón de temperatura o potencia inyectada; tras permitir un tiempo de equilibrio térmico. Por último, el punto e corresponde al día 30 de julio, 20 días después de finalizar el ensayo, tiempo suficiente para garantizar la recuperación térmica del pilote. La nomenclatura de los puntos consiste en una secuencia de tres caracteres que describen por orden el ensayo (C), el punto del ciclo y el tipo de sensor que lo ha registrado: E (extensómetro) o F (fibra óptica).

Tabla VI-3: Momentos específicos identificados durante el ensayo C

Punto del ciclo	Fecha	Hora	Observaciones
C0	26/06/2013	10:57	Antes de comenzar ensayo
Ca	01/07/2013	12:27	Final de la fase 1
Cb	05/07/2013	12:27	Final de la fase 2
Cc	10/07/2013	14:30	Final de la fase 3
Cd	11/07/2013	11:54	Final del ensayo
Ce	30/07/2013	10:07	Tras recuperación térmica

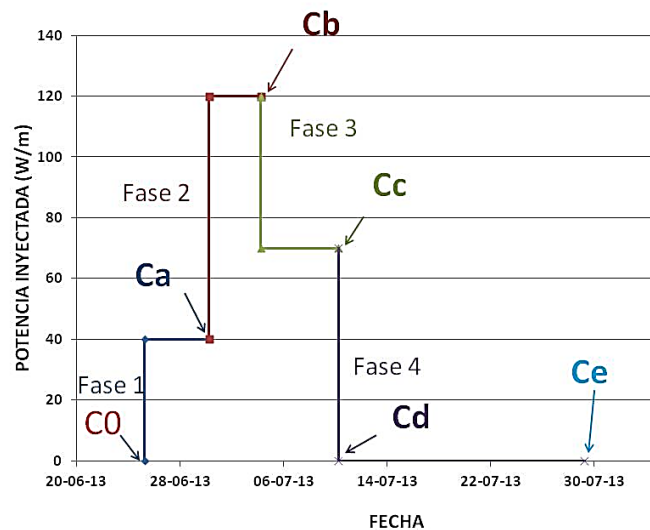


Figura VI-30: Puntos estudiados en el ensayo C.

VI.4.1 TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL INTERIOR DEL PILOTE

La inyección de calor mediante los escalones de potencia descritos genera variaciones de temperatura espacio-temporales, es decir, se producen variaciones térmicas con la profundidad a lo largo del pilote que, además, evolucionan con el tiempo (Figura VI-31).

Se observa en esta figura que inicialmente (momento **C0**), la temperatura del terreno oscila en torno a los 20°C. La variación térmica es mayor en los primeros metros, pero

a partir de los 8 m de profundidad se estabiliza en este valor con una ligera tendencia al enfriamiento con la profundidad. La curva correspondiente al momento **Ca**, tras la estabilización térmica del sistema durante la inyección de 40 W/m, describe un calentamiento general del pilote de 5°C, definiendo una línea paralela a la inicial. El momento **Cb**, correspondiente a la inyección de 120 W/m, supone el máximo incremento térmico del ensayo, ascendiendo unos 15°C respecto a la temperatura inicial del terreno. Esta línea oscila entre los 35°C que alcanza en los metros más superficiales y los 33°C registrados a mayor profundidad. En la siguiente fase del ensayo (**Cc**) se inyecta una potencia intermedia de 70 W/m, alcanzándose los 30°C en los primeros 8 metros y 27°C, en los últimos 6 metros del pilote. Una vez finalizado el ensayo (momento **Cd**), la temperatura en el interior del pilote disminuye hasta valores semejantes a los del primer escalón de potencia (Ca). Acabado el ensayo C, el terreno recupera la temperatura inicial (**Ce**) a partir de los ocho metros de profundidad. Los primeros metros sufren una cierta desviación debido a la influencia de la temperatura exterior.

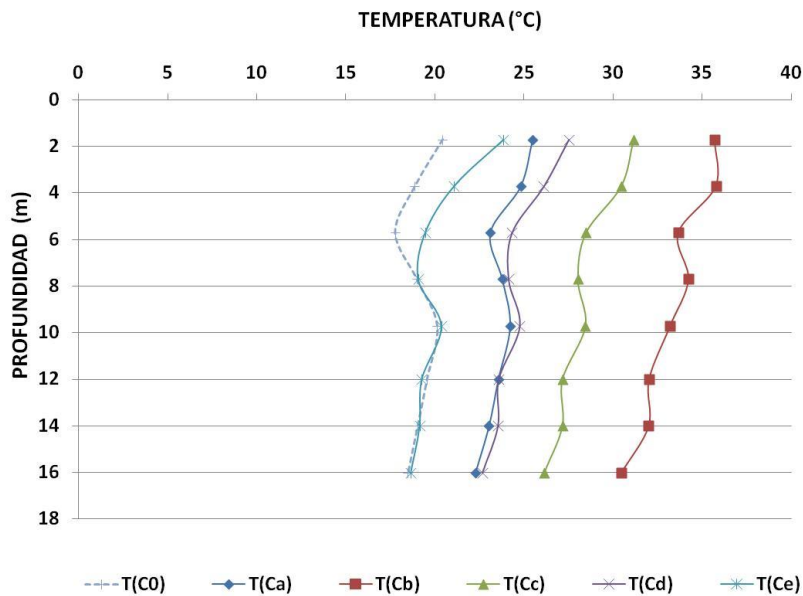


Figura VI-31: Variación de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo C

VI.4.2 MOVIMIENTOS MEDIDOS EN LA CABEZA DEL PILOTE

Los diferentes escalones de potencia inyectada inducen movimientos horizontales y verticales en la cabeza del pilote. Para medirlos, se utilizaron los LVDT's indicados en la Figura VI-32.

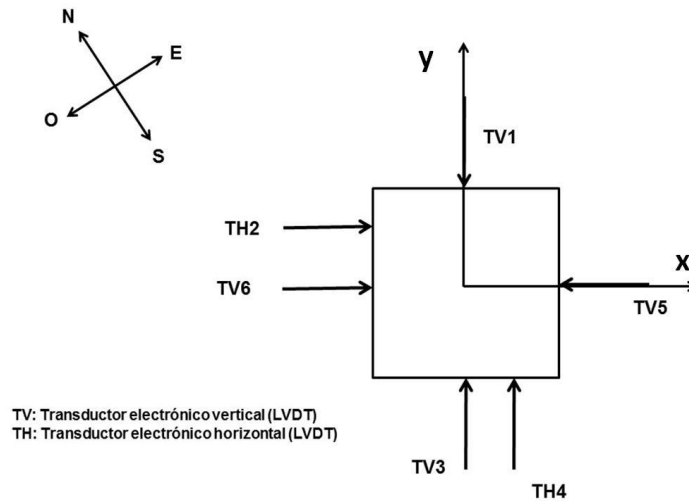


Figura VI-32: Disposición de los sensores en cabeza durante el ensayo C

Los movimientos registrados por cada sensor se reflejan en la Tabla VI-4.

Tabla VI-4. Resumen de movimientos experimentados en cabeza por el pilote (mm)

Punto del ciclo	TV1	TH2	TV3	TH4	TV5	TV6
	$\Delta\delta_{1v}$	$\Delta\delta_{2h}$	$\Delta\delta_{3v}$	$\Delta\delta_{4h}$	$\Delta\delta_{5v}$	$\Delta\delta_{6v}$
Ca	0,33	0,18	0,31	-0,05	0,31	0,39
Cb	1,17	0,61	1,14	-0,23	1,23	1,36
Cc	0,7	0,57	0,7	-0,25	0,79	0,84
Cd	0,37	0,41	0,38	-0,3	0,46	0,47

VI.4.2.1 Movimientos verticales

En la Figura VI-33 se puede observar el desplazamiento vertical detectado en la cabeza del pilote a lo largo del ensayo C. En primer lugar, cabe destacar que los sensores verticales dispuestos a lo largo del eje x (TV5 y TV6) miden movimientos ligeramente superiores a los dispuestos en el eje y (TV1 y TV3). De cualquier forma, los movimientos en la cabeza presentan una respuesta inmediata a la aplicación de la carga térmica, evolucionando con el tiempo hacia la estabilización en cada escalón de

carga. En el primer escalón de potencia de 40 W/m, el máximo movimiento que se observa en cabeza de levantamiento es de 0,4 mm. El segundo escalón del ensayo, durante el cual se inyectó la máxima potencia térmica (120 W/m), generó un levantamiento máximo de 1,4 mm. Durante el tercer y último escalón de potencia (70 W/m), la subida que experimenta el pilote en la cabeza es de alrededor de 0,8 mm. Una vez finalizado el ensayo C, los cuatro sensores registran una tendencia a disminuir y a recuperarse la cota inicial de la cabeza del pilote. Aparte del comportamiento del pilote como respuesta a las tres fases del ensayo C, se observa una pequeña oscilación cíclica debida a la oscilación térmica diaria del exterior a lo largo de todo el ensayo C.

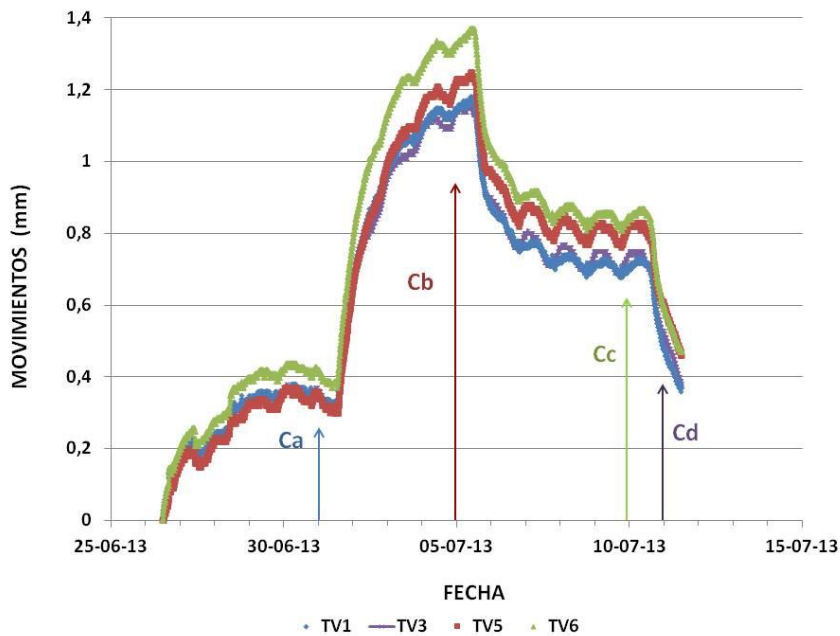


Figura VI-33: Movimientos verticales durante el ensayo C

VI.4.2.2 Movimientos horizontales

Los movimientos horizontales en la cabeza del pilote se muestran en la Figura VI-34 . En ella se observa que la influencia de las oscilaciones térmicas diarias en las medidas registradas por los sensores, es relativamente mayor que en el caso de los movimientos verticales vistos anteriormente. En los ensayos A y B no se observan las oscilaciones térmicas que se registran en el ensayo C debido a que no existía, en A y B, circulación de agua a través del pilote.

Por otro lado, los movimientos horizontales medidos durante el ensayo C no parecen ser tan sensibles a los distintos escalones de potencia inyectada como en el caso de los movimientos verticales, aunque sí se detecta una tendencia ascendente con el incremento de potencia térmica. En general, se observa que al inyectar calor en el pilote, el sensor TH2 se mueve en sentido positivo del eje “x” mientras que el sensor TH4 se mueve en sentido negativo del eje “y”. Esto significa un movimiento resultante en la dirección Sur-sudeste.

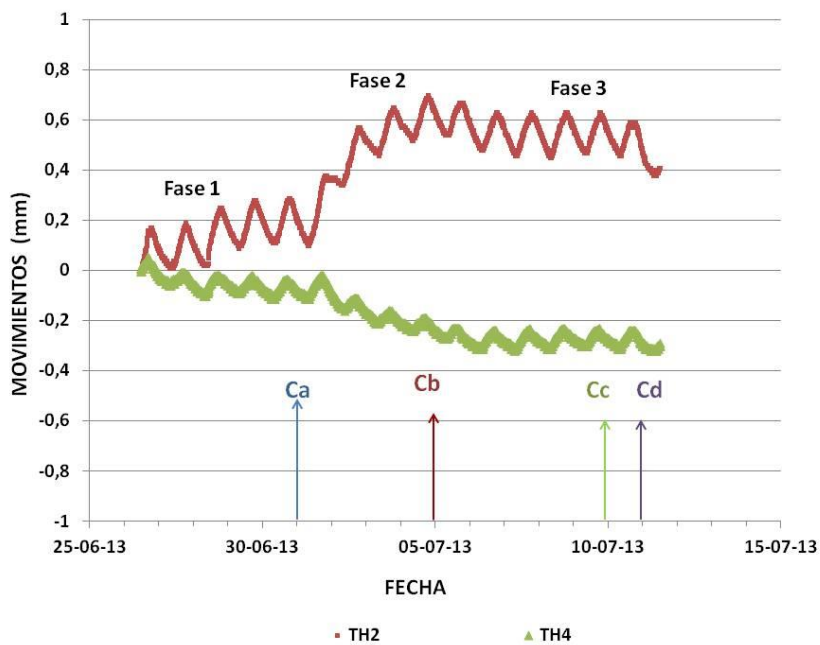


Figura VI-34: Movimientos horizontales durante el ensayo C

VI.4.3 DEFORMACIONES MEDIDAS EN EL INTERIOR DEL PILOTE

Como ya se ha desarrollado en el apartado VI.2.1, los distintos sensores embebidos en el seno del hormigón, extensómetros y fibra óptica, permiten medir y registrar el comportamiento termo-mecánico del mismo en términos de deformación observada y deformación no desarrollada respectivamente. Se exponen a continuación detalladamente los resultados.

VI.4.3.1 Extensómetros: Deformación observada

Los extensómetros miden de forma directa la deformación observada (ϵ_{obs}) a lo largo del pilote debido a los diferentes escalones de potencia térmica inyectada, en condiciones reales y con el movimiento constreñido por la fricción por fuste con el terreno circundante y, en su caso, por la limitación de deformación en sus extremos. Expresada en $\mu\text{m/m}$, matemáticamente se define mediante la siguiente expresión:

Ecuación VI-4

$$\epsilon_{obs} = \epsilon_{final} - \epsilon_{inicial} + \alpha_{hilo} \cdot \Delta T$$

Donde:

$\epsilon_{inicial}$ ($\mu\text{m/m}$) es la deformación que mide el extensómetro en el momento C0, tomada como referencia

ϵ_{final} ($\mu\text{m/m}$) es la deformación que mide el extensómetro en cualquier momento del ensayo C

α_{hilo} es el coeficiente de dilatación térmica del hilo del extensómetro, $\alpha_{hilo} = 12,2 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$.

ΔT es la variación de temperatura entre el momento inicial C0 y el momento estudiado del ensayo C ($^\circ\text{C}$).

En la Figura VI-35 se muestra la evolución de las curvas de deformación observada en el interior del pilote a lo largo del ensayo C, considerando como lectura inicial el momento C0. Cada curva se designa por la letra C (ensayo) seguido de la letra correspondiente al punto del ensayo y de la letra E del sensor empleado (extensómetro).

En el primer escalón de 40 W/m de potencia inyectada (**Ca**), el pilote comienza a sufrir unas deformaciones positivas de dilatación (tracción), más acusada en los primeros 10 metros y de un valor constante (20 $\mu\text{m/m}$) a partir de esa profundidad. En el segundo escalón de 120 W/m de potencia inyectada (**Cb**), la deformación sufre un acusado aumento, superando los 100 $\mu\text{m/m}$ en los primeros metros. A partir de los 8 m de profundidad, la deformación observada se reduce hasta acercarse a 70 $\mu\text{m/m}$, y se mantiene constante en los últimos 6 metros del pilote. En el tercer escalón de 70 W/m de potencia inyectada (**Cc**), el pilote experimenta unas deformaciones intermedias entre los valores de las líneas correspondientes a los momentos Ca y Cb, describiendo una recuperación parcial del pilote al disminuir la potencia térmica inyectada. Al igual

que en las curvas previas, la deformación resulta más variable en los 10 metros superiores y se estabiliza en torno a 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ a partir de los 10 m de profundidad. Una vez finalizada la inyección de calor (**Cd**), se mantiene una deformación de tracción a lo largo de todo el pilote, de valor máximo cercano a 40 $\mu\text{m}/\text{m}$. Dieciséis días después del fin del ensayo (**Ce**) se mide una cierta deformación de compresión con respecto al origen C0, de valor máximo 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ en los diez primeros metros del pilote, que tiende a desaparecer con la profundidad.

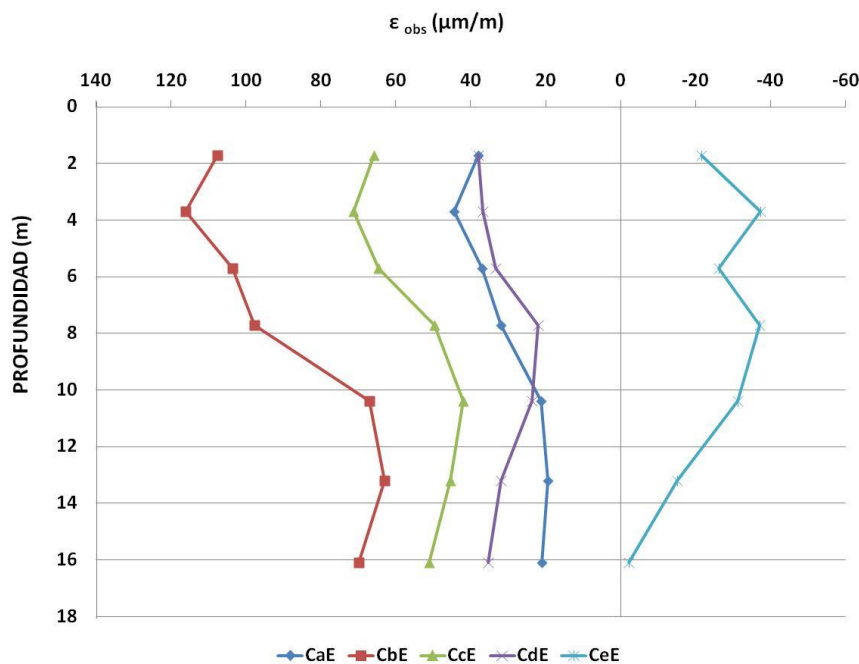


Figura VI-35: Evolución de la deformación observada durante el ensayo C.

VI.4.3.2 Fibra óptica: deformación no desarrollada

Los sensores de fibra óptica miden la deformación no desarrollada de origen térmico ($\epsilon_{\text{no desarrollada}}$), esto es, la parte de deformación térmica libre que no se produce debido a las constricciones impuestas por el terreno a lo largo del fuste y la punta, impidiendo desarrollar esta deformación en su totalidad.

En la Figura VI-36 se muestra la evolución de las curvas de deformación no desarrollada en el interior del pilote a lo largo del ensayo C, considerando como lectura

inicial el momento C0. Cada curva se denomina mediante la letra C, seguida del punto del ensayo al que corresponde, y de la letra F del sensor empleado (fibra óptica).

A diferencia de las deformaciones positivas de tracción registradas por los extensómetros, los valores de deformación no desarrollada medidas por los sensores de fibra óptica son de signo negativo, es decir, de contracción.

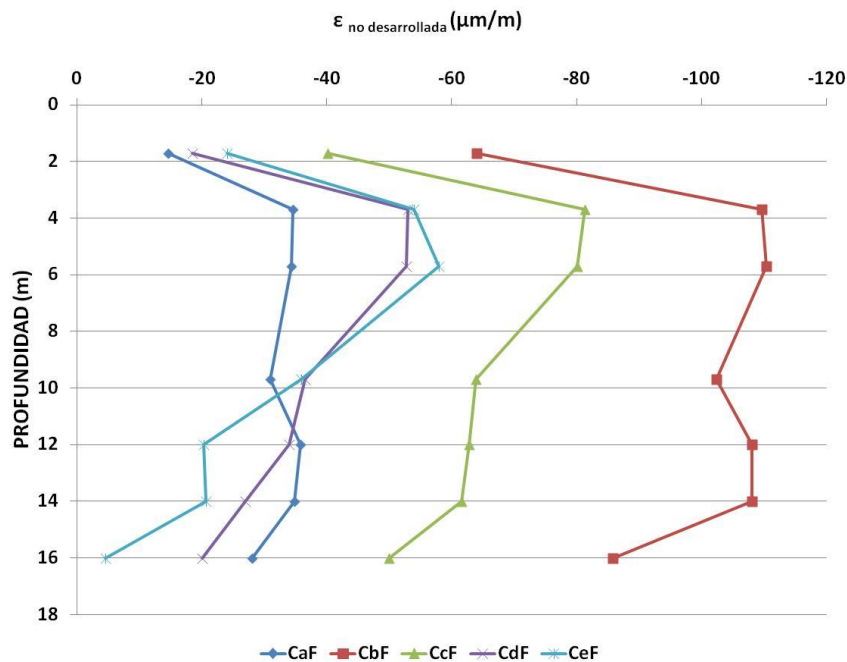


Figura VI-36: Evolución de la deformación no desarrollada durante el ensayo C

Las curvas de variación de deformación no desarrollada con la profundidad obtenidas a partir de las medidas de los sensores de fibra óptica muestran un comportamiento proporcional a la potencia térmica inyectada en el pilote, es decir, cuanto mayor es el calor introducido, mayor es la deformación no observada. Además, se observa en todas ellas una cierta distinción entre el comportamiento deformacional de la mitad superior e inferior del pilote. Los diez metros superiores son los que muestran los mayores valores de deformación no observada, mientras en los metros inferiores esta deformación tiende a disminuir con la profundidad.

VI.4.4 TENSIONES EN EL INTERIOR DEL PILOTE

Como ya se ha mencionado anteriormente, la inyección de calor en el pilote induce en éste una tendencia a la dilatación. Debido a las constricciones impuestas por el terreno

a lo largo del fuste y la punta, no es posible desarrollar toda la dilatación térmica teórica libre. Esta deformación no desarrollada genera tensiones internas de origen térmico. La forma de obtener matemáticamente estas tensiones depende del tipo de sensor empleado.

En el caso de los extensómetros, es necesario determinar previamente el valor de la deformación no desarrollada a partir de la deformación observada medida por el sensor y la deformación térmica libre calculada teóricamente:

Ecuación VI-5

$$\epsilon_{no\ desarrollada} = \epsilon_{th\ L} - \epsilon_{obs}$$

Donde:

$\epsilon_{th\ L}$ es la deformación térmica libre teórica calculada a partir del coeficiente de dilatación térmica del pilote (α) y la diferencia de temperatura (ΔT) entre en momento inicial C0 y el momento estudiado: $\epsilon_{th\ L} = \alpha \cdot \Delta T$

ϵ_{obs} es la deformación observada medida de forma directa por los extensómetros

$\epsilon_{no\ desarrollada}$ es la diferencia entre las dos anteriores

Esta deformación no desarrollada genera un incremento de tensión de origen térmico en el interior del pilote:

Ecuación VI-6

$$\sigma_{t\acute{e}rm} = E \cdot \epsilon_{no\ desarrollada}$$

Donde:

$\sigma_{t\acute{e}rm}$ es la tensión de origen térmico (kN/m²)

E es la constante de elasticidad del pilote (313.142,7 MN/m²)

$\epsilon_{no\ desarrollada}$ es la deformación no desarrollada ($\mu\text{m/m}$)

Dado que los sensores de fibra óptica miden directamente la deformación no desarrollada ($\epsilon_{no\ desarrollada}$), permiten determinar el valor de la tensión de origen térmico directamente aplicando la ecuación anterior.

De cualquiera de las dos formas, tanto a partir de medidas de extensómetros como de medidas de fibra óptica, el resultado final es un incremento de tensión interna de origen térmico ($\Delta\sigma_{\text{térm}}$).

Partiendo de la base de que en el momento C0 el pilote está sometido únicamente a una carga mecánica, la curva de variación de la tensión con la profundidad en este momento será únicamente de origen mecánico (σ_{mec}). Por lo tanto, la tensión total a la que se encuentra sometido el pilote a cada profundidad durante todo el ensayo C será la suma de la tensión de origen mecánico (curva C0) más el incremento de tensión interna de origen térmico:

Ecuación VI-7

$$\sigma_{\text{térm+mec}} = \sigma_{\text{mec}} + \Delta\sigma_{\text{térm}}$$

VI.4.4.1 Incrementos de tensión interna de origen térmico

Tanto a partir de medidas de extensómetros como de medidas de fibra óptica, el resultado final es un incremento de tensión interna de tipo compresivo de origen térmico ($\Delta\sigma_{\text{térm}}$). En la Figura VI-37 y Figura VI-38 se representa la evolución a lo largo del ensayo C de las curvas de distribución de los incrementos de compresión (signo negativo) de origen térmico, a partir de los datos que arrojan los extensómetros y los sensores de fibra óptica.

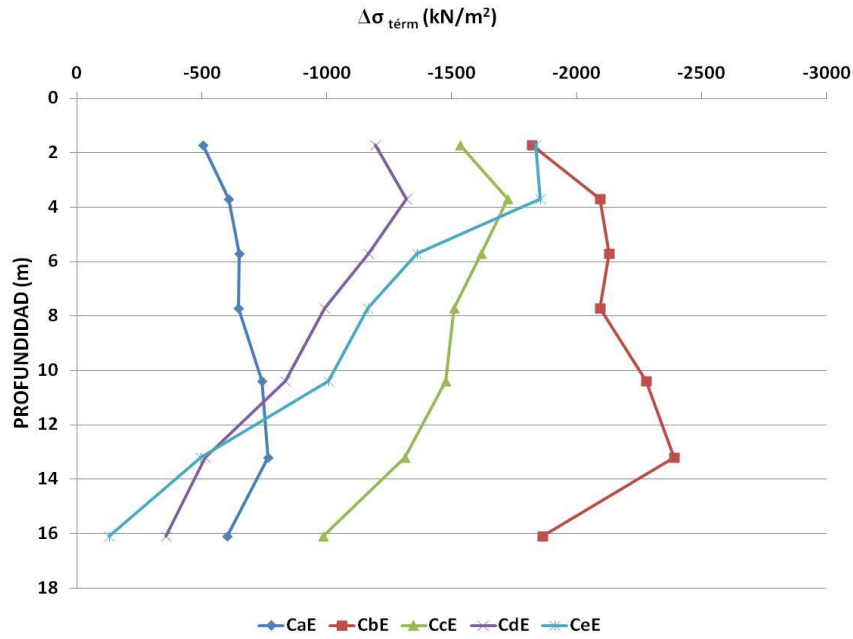


Figura VI-37: Evolución de las curvas de variación de la tensión de origen térmico durante el ensayo C (extensómetros)

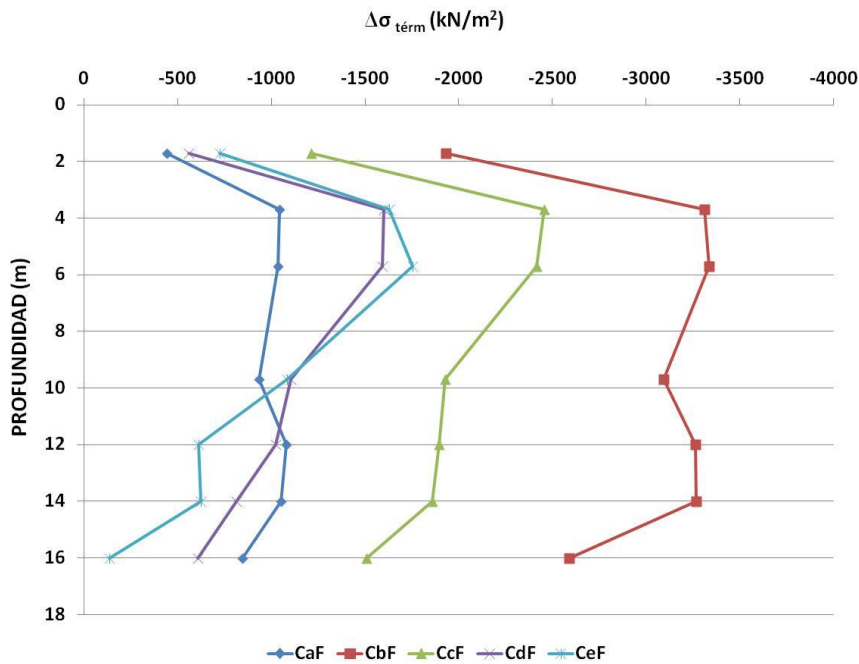


Figura VI-38: Evolución de las curvas de variación de la tensión de origen térmico durante el ensayo C (fibra óptica)

En las dos figuras se observa una clara dependencia del incremento de tensión de origen térmico de carácter compresivo en función del calor inyectado en el pilote. Comparando las dos figuras, se observa que los incrementos de tensión de

compresión determinados a partir de la fibra óptica son en general, mayores que los determinados a partir de las lecturas de los extensómetros. Los mayores incrementos de tensión se verifican en el punto Cb del ensayo, de máxima inyección de calor en el pilote, siendo del orden de 2400 kN/m² y de 3400 kN/m², según se haya determinado a partir de los extensómetros o la fibra óptica, respectivamente.

VI.4.4.2 Tensiones totales

Partiendo de la base de que el momento C0 el pilote está sometido únicamente a una carga mecánica, la curva de variación de la tensión con la profundidad es únicamente de origen mecánico (σ_{mec}). Por lo tanto, según la Ecuación VI-7, la tensión total a la que se encuentra sometido el pilote ($\sigma_{t\acute{e}rm + mec}$) durante todo el ensayo C será la suma de la tensión de origen mecánico en el momento C0 (σ_{mec}) más el incremento de la tensión interna de origen térmico ($\Delta\sigma_{t\acute{e}rm}$).

En la Figura VI-39 y Figura VI-40 se puede observar la evolución de las curvas de distribución de la tensión total con la profundidad a lo largo de los ensayos C, obtenidas a partir de los extensómetros y los sensores de fibra óptica, respectivamente.

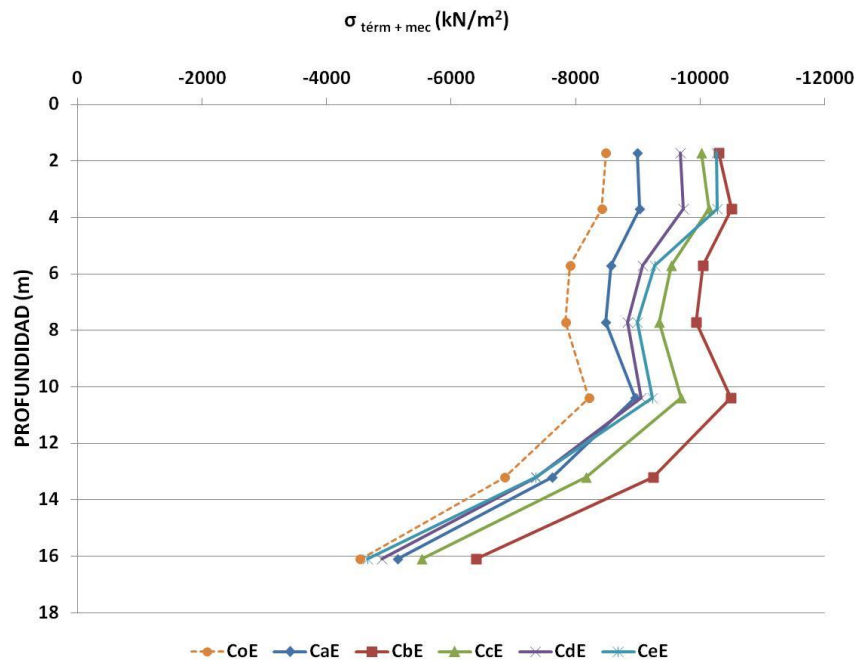


Figura VI-39: Evolución de las curvas de tensión total a lo largo del ensayo C (extensómetros)

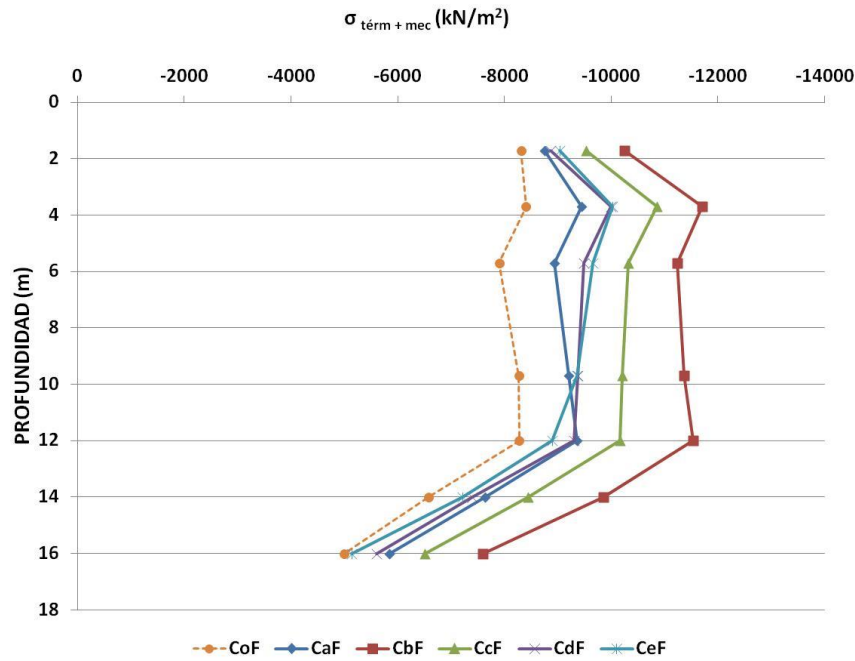


Figura VI-40: Evolución de las curvas de tensión total a lo largo del ensayo C (fibra óptica)

Se distinguen en ambas figuras dos zonas claramente diferenciadas: los primeros 10 metros de pilote, en los que la tensión total se mantiene constante, y la parte inferior a esta profundidad, donde la tensión compresiva disminuye progresivamente a medida que se aproxima a la punta.

VI.4.5 CARGAS AXILES EN EL PILOTE

Las tensiones generadas durante el ensayo C debido a la deformación impedida, se pueden transformar en esfuerzo axial como el producto de la tensión por el área del pilote, que es constante y conocida, según la Ecuación VI-2, mostrada en la página 242.

De igual manera que en el apartado anterior, se puede trabajar con el incremento de carga de origen térmico o, asumiendo que en el momento C0 únicamente existen cargas de origen mecánico, sumando ambas para obtener la carga total que actúa en el interior del pilote.

Ecuación VI-8

$$N_{térm+mec} = N_{mec} + \Delta N_{térm}$$

VI.4.5.1 Incremento de carga de origen térmico

A continuación, se puede observar la evolución de las curvas de incremento de carga axil de origen térmico a lo largo del ensayo C, obtenidas a partir de los datos de extensómetros (Figura VI-41) y fibra óptica (Figura VI-42), respectivamente.

Los incrementos de carga de origen térmico resultan de -300 kN con los extensómetros y de -400 kN con la fibra óptica, en el punto de máxima potencia inyectada. A partir de este momento del ensayo, a medida que disminuye el calor inyectado, el pilote se recupera, aunque no recupera el estado inicial de carga. La fibra óptica registra un incremento de carga mayor que los extensómetros (Figura VI-41 y Figura VI-42), de forma similar a la descrita en el apartado de tensiones.

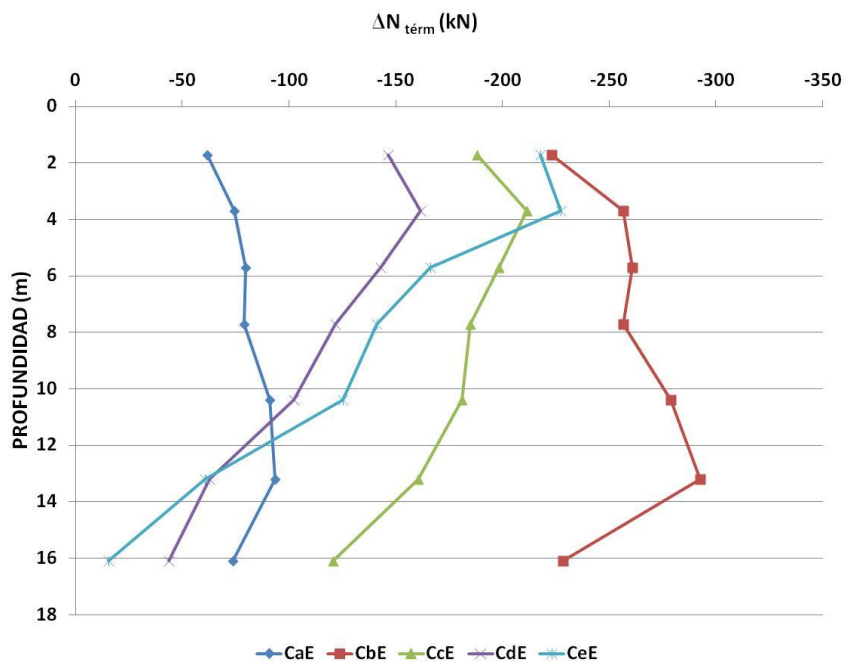


Figura VI-41: Evolución del perfil de carga en el interior del pilote durante el ensayo C (extensómetros)

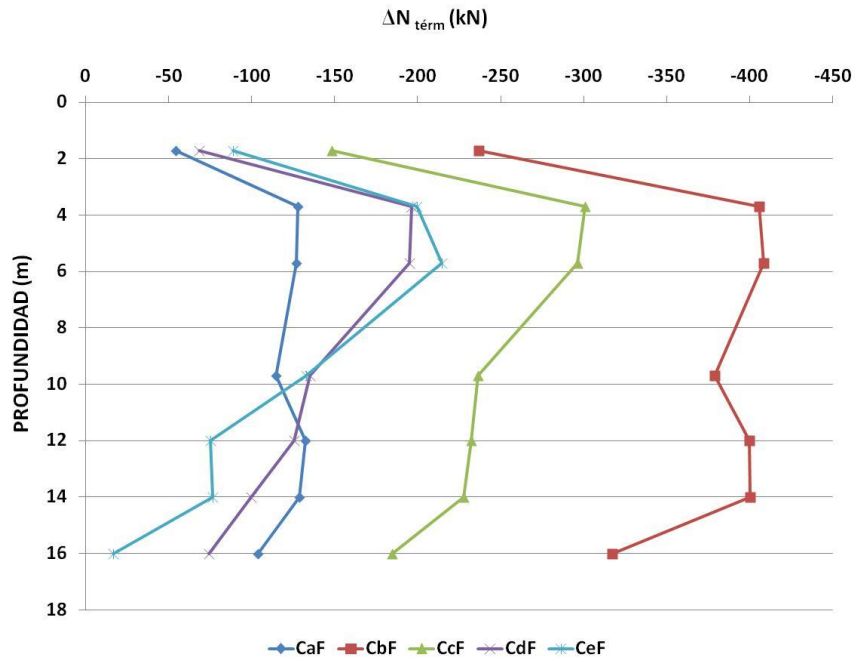


Figura VI-42: Evolución del perfil de carga en el interior del pilote durante el ensayo C (fibra óptica)

VI.4.5.2 Cargas totales

Para obtener la distribución de carga axil total a lo largo del pilote, se puede sumar la distribución de cargas de origen térmico a la de origen mecánico, obtenida de la curva correspondiente al momento C0 (Ecuación VI-8, página 264). A continuación, se representan la evolución de las curvas de distribución de carga axil total con la profundidad a lo largo del ensayo C, obtenidas a partir de los extensómetros (Figura VI-43) y los sensores de fibra óptica (Figura VI-44).

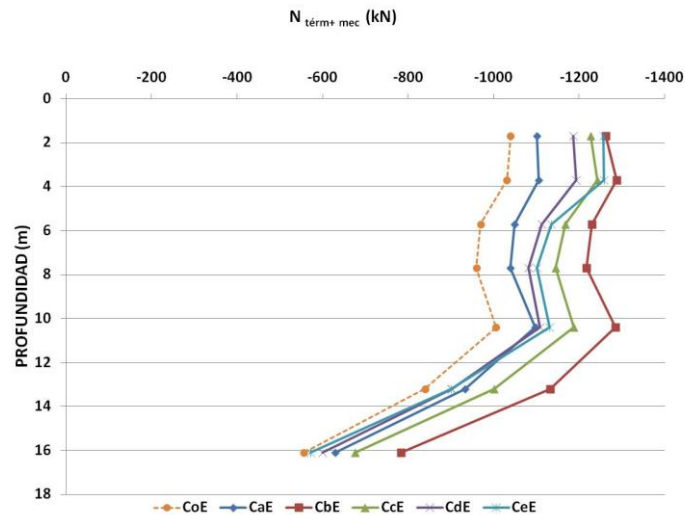


Figura VI-43: Evolución de las curvas de carga total a lo largo del ensayo C (extensómetros)

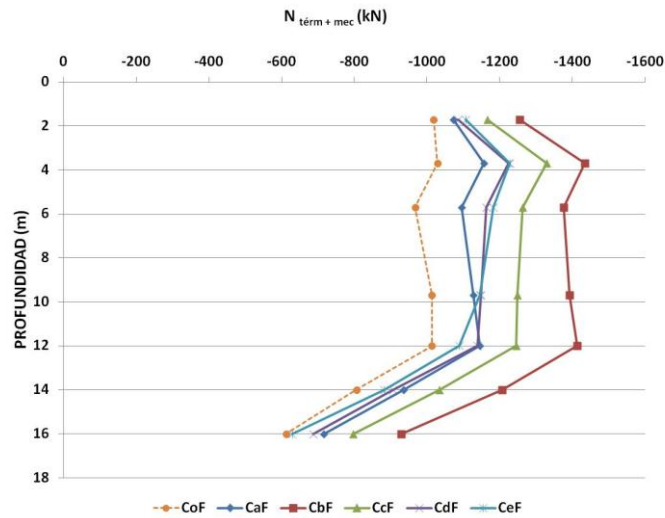


Figura VI-44: Evolución de las curvas de carga total a lo largo del ensayo C (fibra óptica)

Los dos tipos de sensores arrojan curvas de morfología y tendencias similares, aunque los sensores de fibra óptica parecen medir valores sensiblemente mayores que los extensómetros. También ambos tipos de sensores permiten, una vez más, distinguir dos zonas en el pilote. Los 10 m superiores parecen mantener constante la carga axial en torno a un valor dependiente de la cantidad de calor inyectado en el pilote, mientras los 6 metros inferiores muestran una clara tendencia a disminuir la carga con la profundidad. De cualquier forma, los máximos valores de carga registrados corresponden al momento Cb de máxima potencia térmica.

VI.5 PRUEBA DE SIMULACIÓN DE CARGAS DIARIAS: ENSAYO E

Se realizó la prueba de simulación de cargas diarias (ensayo E) entre los días 22/10/2013 y 4/11/2013 con el fin de comprobar el comportamiento del pilote en una instalación geotérmica real y bajo la carga mecánica constante de 1000 kN. Este ensayo simula las condiciones de funcionamiento de una oficina en modo refrigeración (verano), comenzando a enfriar a las siete de la mañana y finalizando a las nueve de la noche durante 15 días consecutivos.

Con el fin de facilitar el análisis del ensayo E, se identificaron una serie de puntos estratégicos indicados en la Tabla VI-5. La nomenclatura definida para los nueve

momentos identificados en cada ciclo térmico diario del ensayo E consiste en una secuencia de cuatro caracteres, que describen por orden el ensayo que ha generado dicho punto experimental, el ciclo, el punto del ciclo y el tipo de sensor que lo ha registrado, de la siguiente forma:

ENSAYO / CICLO / PUNTO DE CICLO / TIPO DE SENSOR

Se tomó una lectura inicial (E0) el día 22/10/2013 justo antes del comienzo del ensayo E. En la Tabla VI-5 se muestran la secuencia térmica de un ciclo dentro del ensayo E y los momentos identificados para su estudio. En todos los casos se hizo circular agua de la red con un caudal de 0,4 m³/h.

Tabla VI-5. Secuencia térmica de un ciclo diario del ensayo E

<i>Punto del ciclo</i>	<i>Hora</i>	<i>Salto térmico</i>	<i>Potencia inyectada (W)</i>	<i>Razón de potencia (W/m)</i>
E0	Antes de comenzar	0	0	0
Ea	11:00	3 °C	1400	80
Eb	14:00	1,5 °C	700	40
Ec	16:00	0	0	0
Ed	19:00	2 °C	875	50
Ee	21:00	1 °C	525	30
Ef	24:00	0	0	0
Eg	3:00	0	0	0
Eh	6:00	0	0	0

La Figura VI-45 muestra el perfil de potencia inyectada de un día laborable, que comienza a las 7 de la mañana y dura 24 horas. Este perfil se repitió durante 15 días consecutivos excepto los domingos, por no ser día laborable (Figura VI-46). El ciclo 1, del primer día, es incompleto, contando solo con los puntos “d” y “h” y con una potencia máxima inyectada de 875 W.

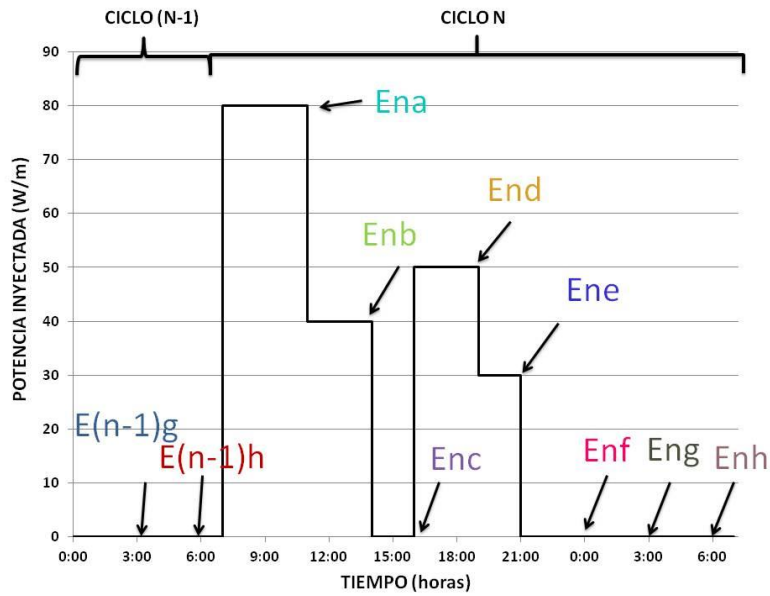


Figura VI-45: Perfil diario del ensayo E. Puntos de toma de datos en un ciclo.

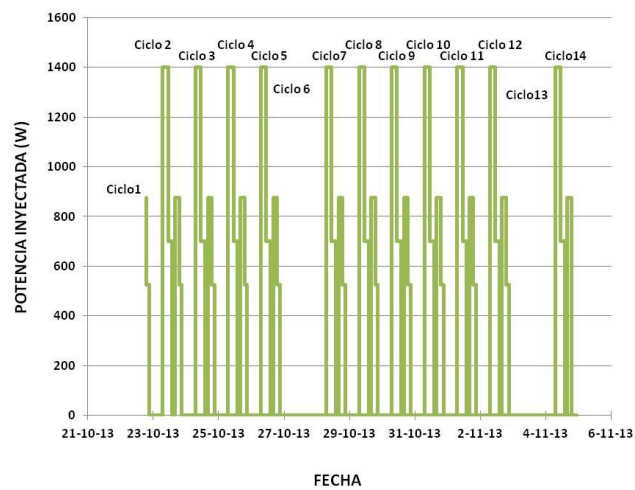


Figura VI-46: Ensayo E completo

Los resultados obtenidos se estructuran en dos apartados. En primer lugar, se muestra en detalle los resultados correspondientes al ciclo número 2 y posteriormente se exponen los datos obtenidos a lo largo de la secuencia completa de los 15 ciclos consecutivos.

VI.5.1 Resultados del ciclo 2

El ciclo 2, de 24 horas de duración, comienza el día 23 de octubre de 2013 a las 7:00 de la mañana y finaliza a las 7:00 del día siguiente. En la Figura VI-47 se puede

observar las fases térmicas del ciclo y los puntos de estudio elegidos. Con el fin de facilitar la interpretación de la figura, se han incorporado los dos últimos puntos del ciclo anterior (ciclo 1).

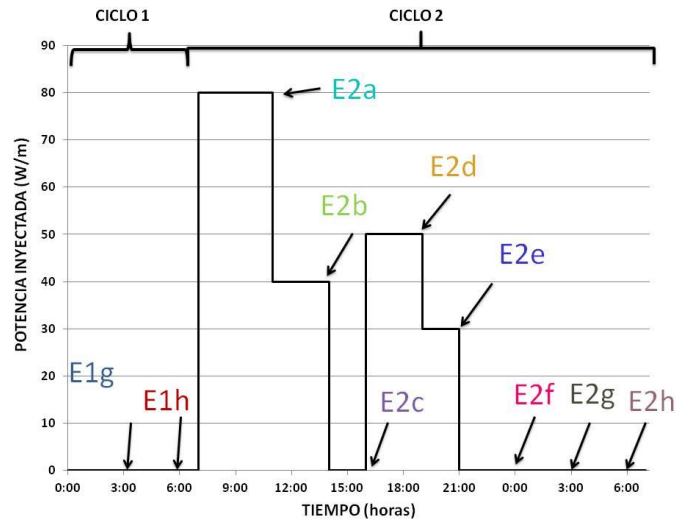


Figura VI-47: Puntos estudiados del ciclo 2

VI.5.1.1 Temperaturas medidas en el interior del pilote

En la Figura VI-48 se muestra la evolución de la temperatura con la profundidad en los diferentes puntos de ensayo seleccionados a lo largo del ciclo 2. La curva E0 corresponde al momento previo al inicio del ensayo E. En primer lugar, se distinguen dos zonas de comportamiento térmico diferente en el interior del pilote: los primeros 8 metros la temperatura decrece linealmente desde un valor máximo comprendido entre 24 y 26 °C a 2 metros de profundidad, hasta valores de entre 18 y 21 °C a los 8 metros. De 10 a 16 m de profundidad la variación es menor y las temperaturas tienden a mantenerse estables dentro de un rango más estrecho, permaneciendo entre 20 y 22°C a lo largo del ensayo. Se observa también que el momento de máxima temperatura registrada es el identificado como E2e, correspondiente a las 21:00 horas, al final de la jornada laboral, coincidiendo con el fin de la inyección de calor en el pilote.

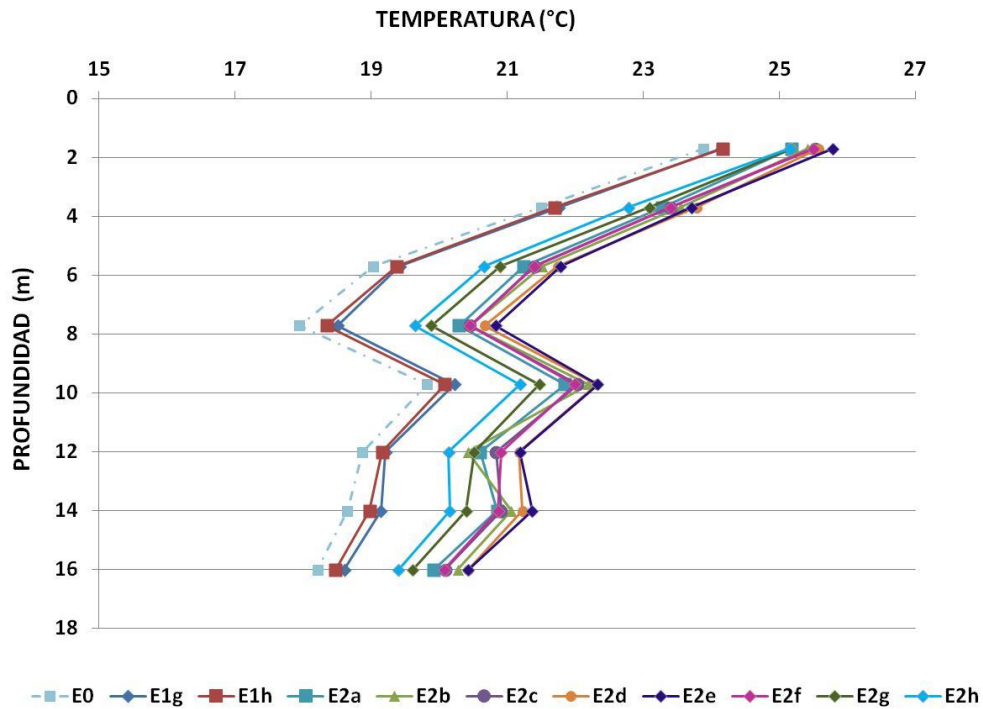


Figura VI-48: Variación de la temperatura con la profundidad en el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

VI.5.1.2 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Los diferentes escalones de potencia inyectada inducen movimientos horizontales y verticales en la cabeza del pilote. Para medirlos, se utilizaron los LVDT's indicados en la Figura VI-49.

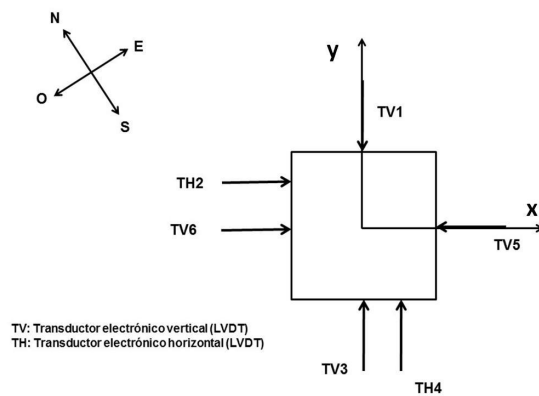


Figura VI-49: Esquema de disposición de los sensores en planta durante el ensayo E.

En la Tabla VI-6 se recopilan los desplazamientos medidos en mm por cada sensor situado en la cabeza del pilote en los puntos seleccionados del ciclo 2. El valor de referencia corresponde al momento E0, de inicio del ensayo E.

Tabla VI-6. Movimientos medidos en cabeza en el ciclo 2 del ensayo E (mm)

Punto del ciclo	TV1	TH2	TV3	TH4	TV5	TV6
	$\Delta\delta_{1v}$	$\Delta\delta_{2h}$	$\Delta\delta_{3v}$	$\Delta\delta_{4h}$	$\Delta\delta_{5v}$	$\Delta\delta_{6v}$
E2a	0,17	0	0,18	-0,03	0,17	0,19
E2b	0,18	0,06	0,19	-0,02	0,19	0,2
E2c	0,17	0,08	0,18	-0,01	0,17	0,18
E2d	0,22	0,12	0,22	-0,01	0,21	0,24
E2e	0,22	0,1	0,23	-0,02	0,23	0,23
E2f	0,18	0,06	0,22	-0,03	0,22	0,2
E2g	0,15	0,02	0,2	-0,05	0,19	0,16
E2h	0,12	-0,01	0,18	-0,06	0,17	0,13

El máximo levantamiento vertical, 0,23 - 0,24 mm, se produce durante los momentos E2d y E2e, que corresponden a las últimas horas de la jornada laboral entre las 19:00 y las 21:00, tras haber recibido 50W/m y 30 W/m respectivamente, y justo antes de finalizar la inyección de calor (Figura VI-50).

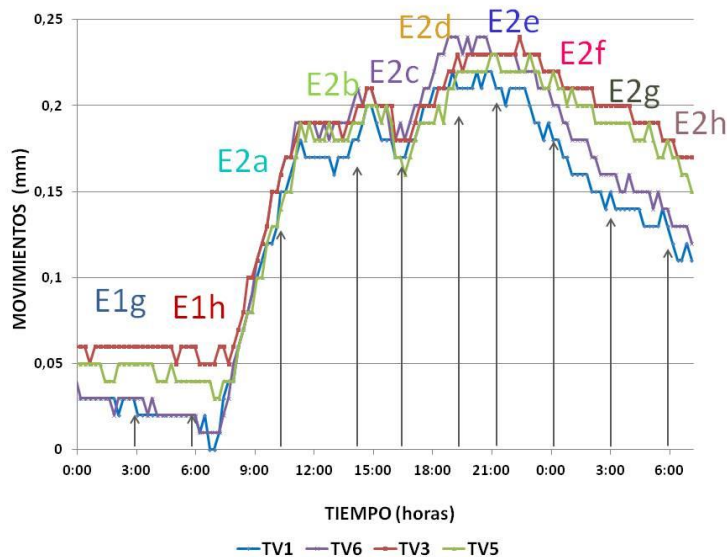


Figura VI-50: Movimientos verticales durante el ciclo 2 del ensayo E

De igual manera, el valor máximo de desplazamiento horizontal, 0,12 mm, se registra en el sensor TH2 en el mismo intervalo horario. En general, los movimientos horizontales de la cabeza del pilote son de una magnitud muy inferior a los movimientos verticales (Figura VI-51).

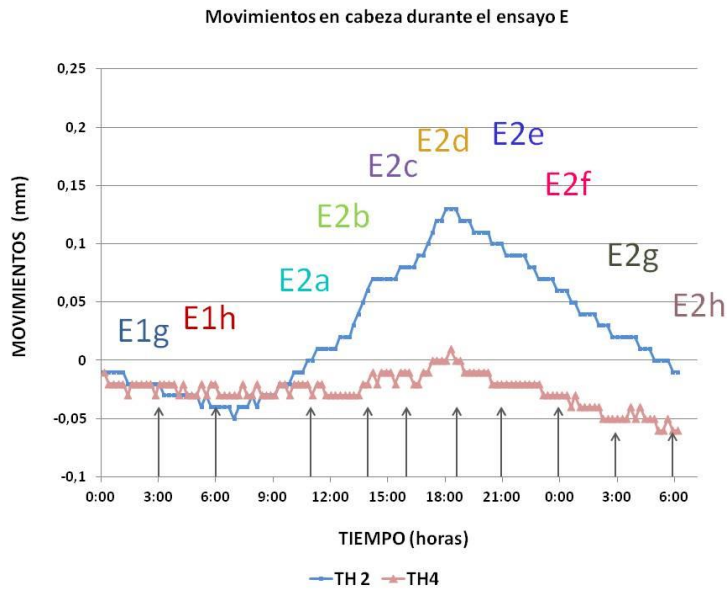


Figura VI-51: Movimientos horizontales durante el ciclo 2 del ensayo E

VI.5.1.3 Deformaciones medidas en el interior del pilote

Se muestran a continuación los datos obtenidos mediante los dos tipos de sensores utilizados. Es importante recordar que, como en apartados anteriores, los extensómetros registran la deformación observada (ϵ_{obs}), mientras que los sensores de fibra óptica miden directamente la deformación no desarrollada ($\epsilon_{no\ desarrollado}$). En ambos casos se considera como referencia que la curva correspondiente al momento E0, antes de comenzar el ensayo, presenta deformación nula ($\epsilon = 0$).

Extensómetros: Deformación observada.

La Figura VI-52 muestra la evolución de las deformaciones observadas, medidas por los extensómetros de cuerda vibrante a cada profundidad, debida a los cambios de temperatura que se producen a lo largo del ciclo 2.

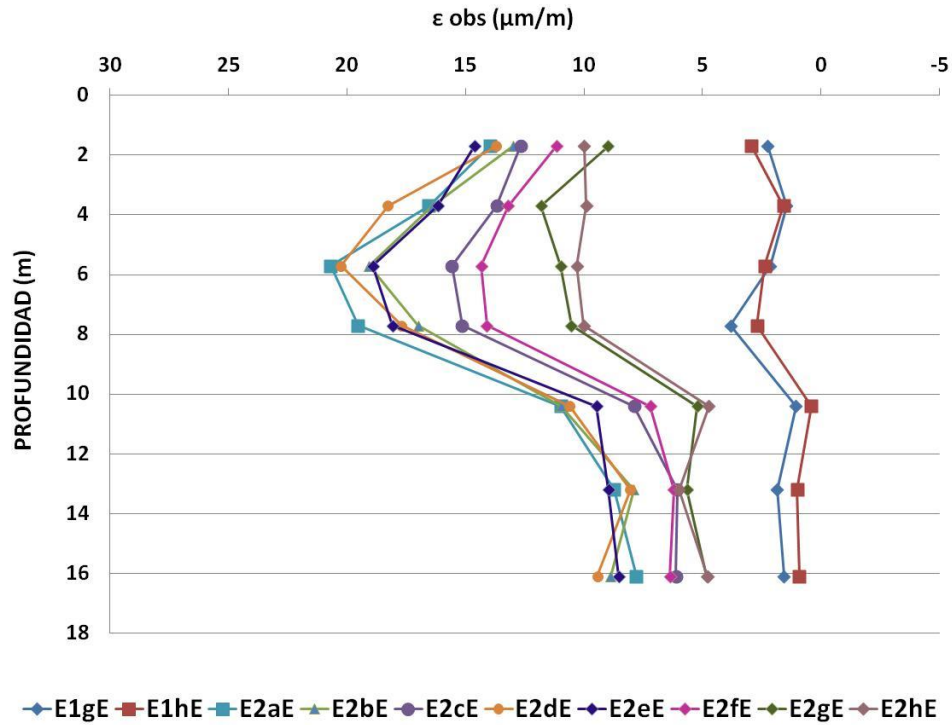


Figura VI-52: Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

Las deformaciones observadas son de signo positivo, lo que, según el criterio de signos explicado al principio de este capítulo, implica dilatación del pilote, consecuencia de su calentamiento. Los máximos valores registrados de dilatación corresponden a los momentos E2a, E2b, E2d y E2E. Estos puntos definen los intervalos comprendidos entre las 11:00 y las 14:00 y entre las 19:00 y las 21:00 durante los cuales se estaba introduciendo calor en el pilote. El resto de curvas, correspondientes a momentos del día sin funcionamiento del sistema geotérmico, muestran una dilatación menor en todo el pilote. Se observan dos zonas bien diferenciadas: los 10 primeros metros de profundidad presentan una mayor dilatación, alcanzando valores de 22 $\mu\text{m/m}$ en los momentos E2a y E2d. A partir de los 10 metros la deformación varía poco con la profundidad, manteniéndose prácticamente constante.

Fibra Óptica: Deformación no desarrollada

La deformación no desarrollada, medida por los sensores de fibra óptica, se puede observar en la Figura VI-53.

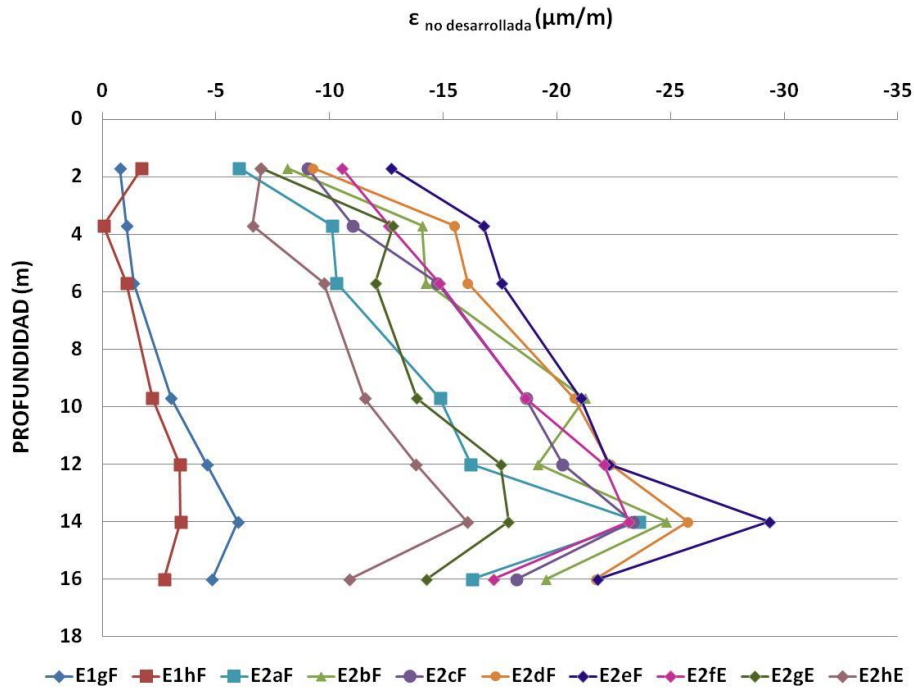


Figura VI-53: Evolución de la deformación no desarrollada con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

Se observan dos diferencias entre el comportamiento de las deformaciones no desarrolladas y las deformaciones observadas, descritas en el apartado anterior: En primer lugar, las deformaciones observadas muestran claramente una dependencia de los momentos de inyección de calor, resultando máximas en los momentos E2a, E2b, E2d y E2E. Por el contrario, las deformaciones no desarrolladas no presentan tan claramente esta dependencia, aunque si se detecta una tendencia a incrementarse a medida que avanza la jornada laboral. A partir del valor máximo, obtenido en el momento E2e, el sistema geotérmico se apaga y las deformaciones no desarrolladas comienzan a disminuir gradualmente. En segundo lugar, las deformaciones observadas definen sus máximos en los 10 metros más superficiales del pilote, mientras los metros inferiores, siempre de menor valor, se mantienen relativamente constantes. Por el contrario, las deformaciones no desarrolladas muestran una clara

tendencia a aumentar con la profundidad hasta los 14m. En todas las curvas, a partir de este valor, disminuyen.

VI.5.1.4 Tensiones en el interior del pilote

Incrementos de tensión interna de origen térmico

Como ya se explicó anteriormente, el calor inyectado en el pilote induce en éste una tendencia a la dilatación. Debido a las constricciones impuestas por fuste y punta, no es posible desarrollar toda la deformación térmica teórica libre. Esta deformación no desarrollada genera tensiones internas de origen térmico. La forma de obtener matemáticamente estas tensiones depende del tipo de sensor empleado, como se explicó en el apartado VI.4.4, página 259. Tanto a partir de medidas de extensómetros como de medidas de fibra óptica, el resultado final es un incremento de tensión interna de origen térmico ($\Delta\sigma_{\text{térm}}$).

Se representa a continuación la evolución a lo largo del ensayo E de las curvas de distribución de los incrementos de tensión interna de origen térmico, obtenida a partir de los datos que arrojan los extensómetros (Figura VI-54) y los sensores de fibra óptica (Figura VI-55).

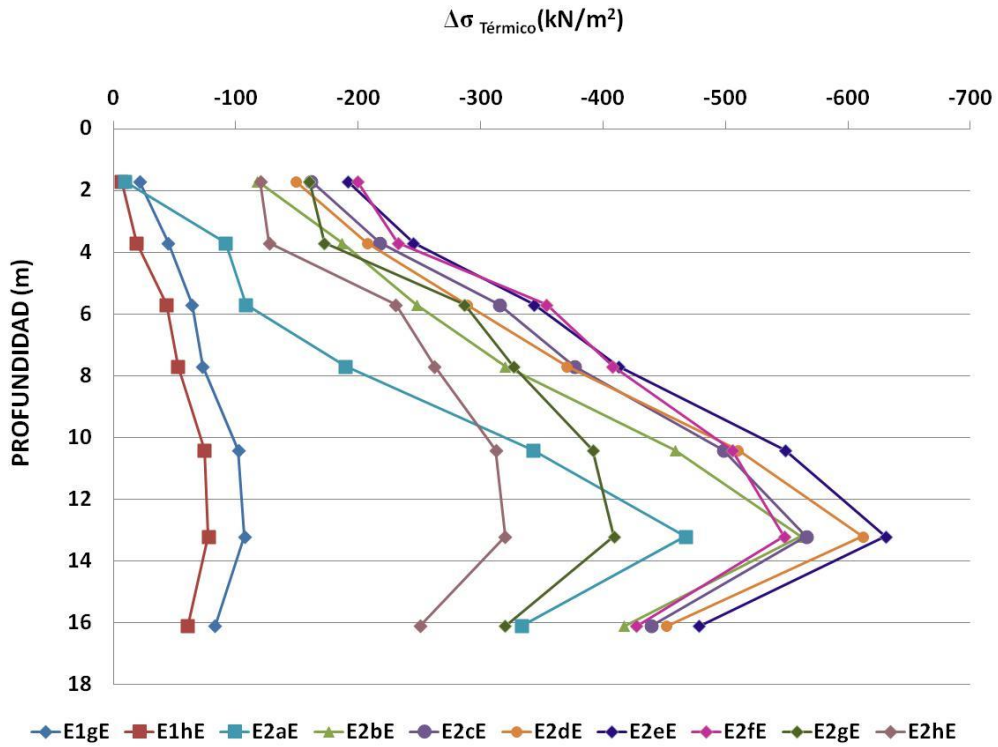


Figura VI-54: Evolución del incremento de tensiones térmicas con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

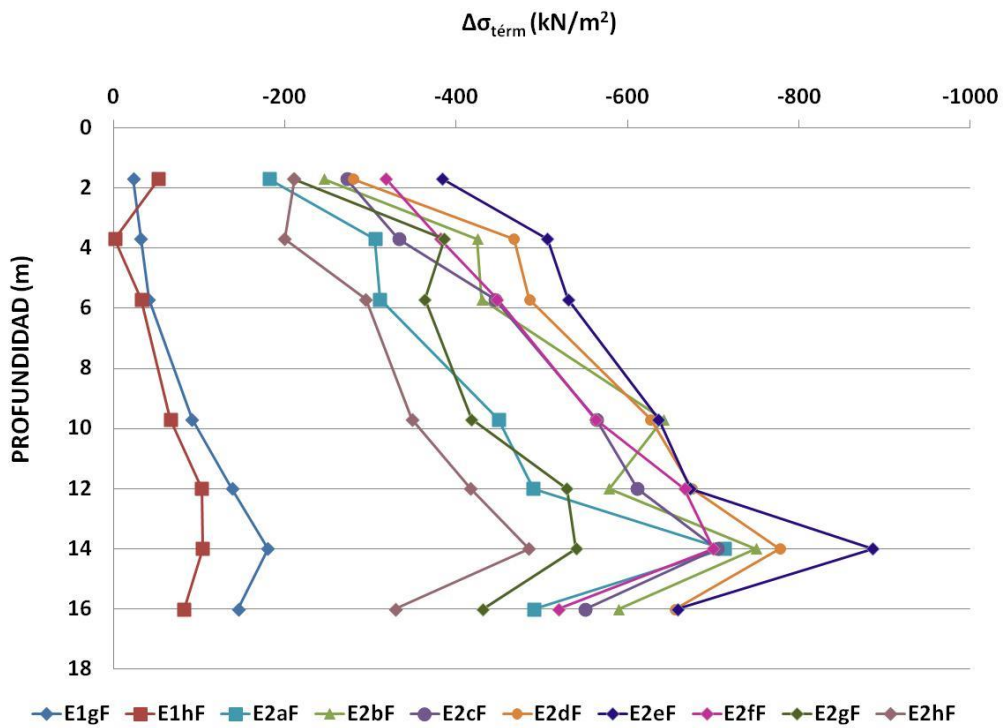


Figura VI-55: Evolución del incremento de tensiones térmicas con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

Se identifica en ambas figuras el momento de máxima compresión, E2e, coincidente con el punto de mayor temperatura a lo largo del día. Tanto en los valores de la tensión obtenidos a partir de los extensómetros, como de los sensores de fibra óptica, se observa una clara tendencia de aumento de las tensiones de tipo compresivo con la profundidad, con un valor máximo en todos los casos en torno a 14 m de profundidad. Aunque reflejando la misma tendencia, los valores determinados mediante la fibra óptica son superiores a los deducidos de los extensómetros.

Tensiones totales

Partiendo de la base de que en el momento E0 el pilote está sometido únicamente a una carga mecánica, la curva de variación de la tensión con la profundidad correspondiente a este momento se considera únicamente de origen mecánico (σ_{mec}). Por lo tanto, las tensiones totales a las que se encuentra sometido el pilote ($\sigma_{t\acute{e}rm + mec}$) durante todo el ensayo E será la suma de la curva de variación de la tensión con la profundidad de origen mecánico en el momento E0 (σ_{mec}) más el incremento de tensión interna de origen térmico ($\Delta\sigma_{t\acute{e}rm}$), según la Ecuación VI-7, expuesta en la 261

En las siguientes figuras se puede observar la evolución de las curvas de distribución de la tensión total con la profundidad a lo largo del ensayo E, obtenidas a partir de los extensómetros (Figura VI-56) y los sensores de fibra óptica (Figura VI-57).

En ambas figuras, muy similares, se aprecia que los incrementos de tensión de origen térmico son muy moderados en comparación con los de origen mecánico. Todas las curvas se encuentran muy cercanas, lo que describe una baja influencia de las diferencias térmicas a lo largo del día en la distribución de tensiones totales en el pilote. Se distinguen nuevamente dos zonas claramente diferenciadas por su estado tensional: los 10-12 primeros metros del pilote muestran unos valores de tensión total bastante constantes, mientras que los últimos metros del pilote describen una tendencia a disminuir la tensión total con el aumento de la profundidad.

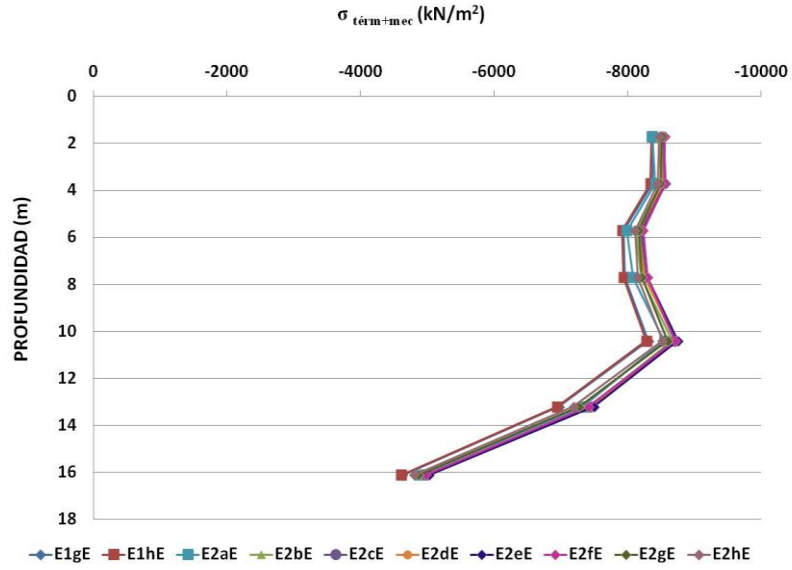


Figura VI-56: Evolución del perfil de tensiones totales durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

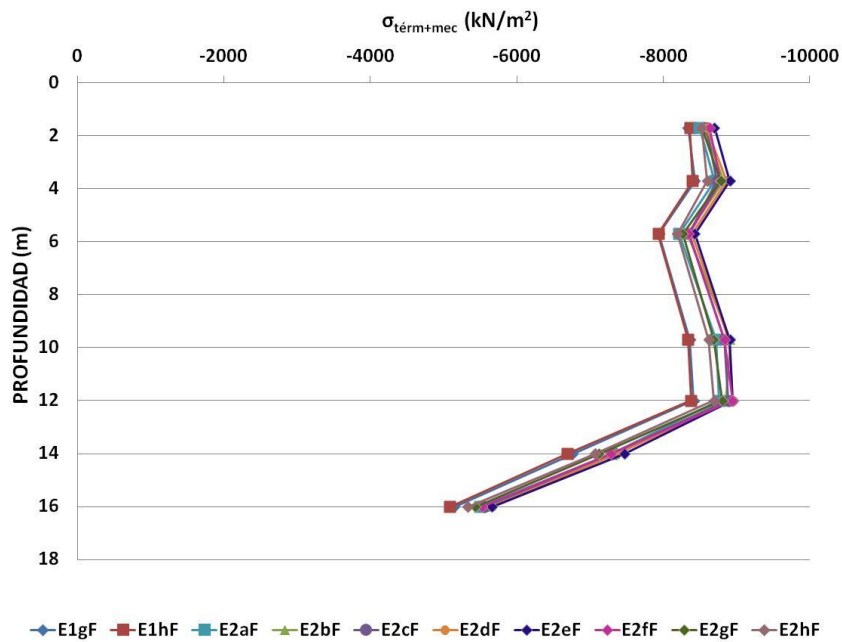


Figura VI-57: Evolución del perfil de tensiones totales durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

VI.5.1.5 Cargas axiales en el pilote

Las tensiones generadas durante el ensayo E debido a la deformación impedida, generan cargas internas de compresión en la sección del pilote. Multiplicando la tensión, obtenida como promedio de los dos sensores situados en la misma profundidad, por el área de la sección transversal del pilote, se puede determinar la carga axial en el mismo.

De igual manera que en el apartado anterior referente a las tensiones, tomando como valor cero de referencia el momento E_0 , se puede distinguir entre el incremento de carga axial de origen térmico y las cargas de origen mecánico. Sumando ambas se obtienen la carga total que actúa en el interior del pilote, según la Ecuación VI-8 (página 264).

Incremento de esfuerzo axial de origen térmico

En las siguientes figuras se puede observar la evolución de las curvas de incremento de esfuerzo axial a lo largo del ensayo E, obtenidas a partir de los datos de extensómetros (Figura VI-58) y sensores de fibra óptica (Figura VI-59).

Durante el ciclo 2 del ensayo E, la máxima carga de origen térmico de compresión registrada en el interior del pilote es de 110 kN en el caso de la fibra y de 80 kN en el caso de los extensómetros, en ambos casos en torno a los 14 m de profundidad. La evolución a lo largo del ciclo es semejante y refleja la evolución de las temperaturas (Figura VI-48).

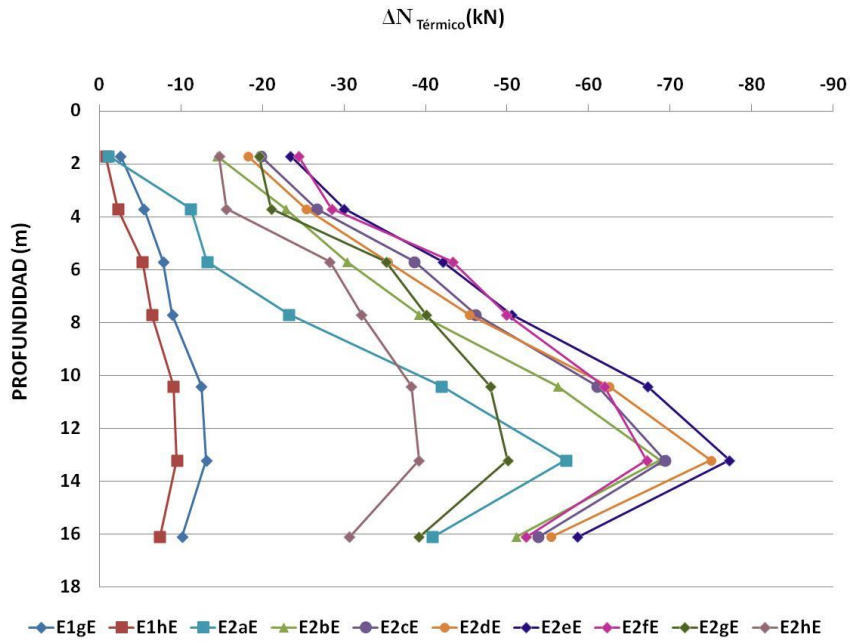


Figura VI-58: Evolución del incremento del esfuerzo axial de origen térmico con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

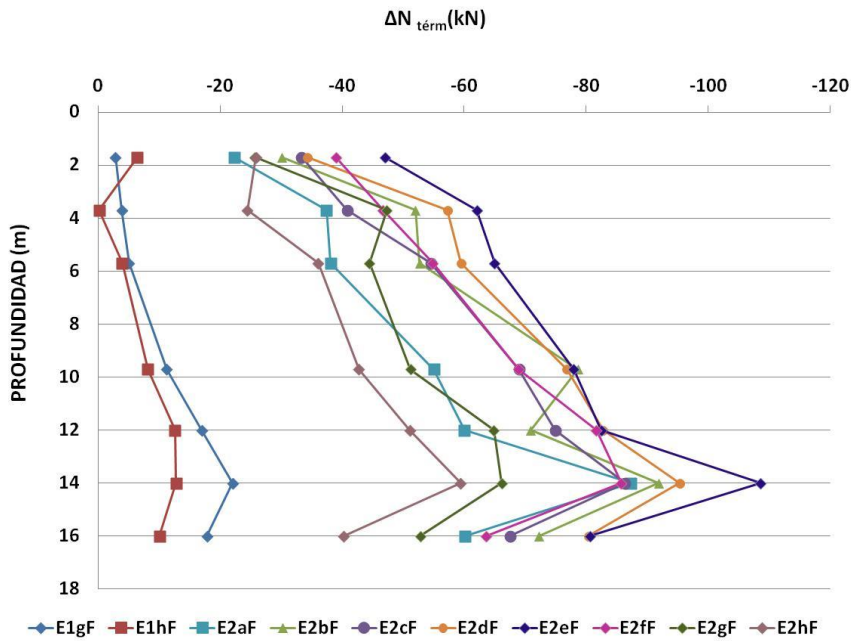


Figura VI-59: Evolución del incremento del esfuerzo axial de origen térmico con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

Cargas axiales totales

De igual manera que en el apartado anterior referente a las tensiones, se puede trabajar con el incremento de carga de origen térmico o, asumiendo que en el momento E0 únicamente existen cargas de origen mecánico, sumar ambas para obtener la carga axial total que actúa en el interior del pilote (Ecuación VI-8, página 264). Se representan a continuación la evolución de las curvas de distribución de carga total con la profundidad a lo largo del ensayo E, obtenidas a partir de los extensómetros (Figura VI-60) y los sensores de fibra óptica (Figura VI-61).

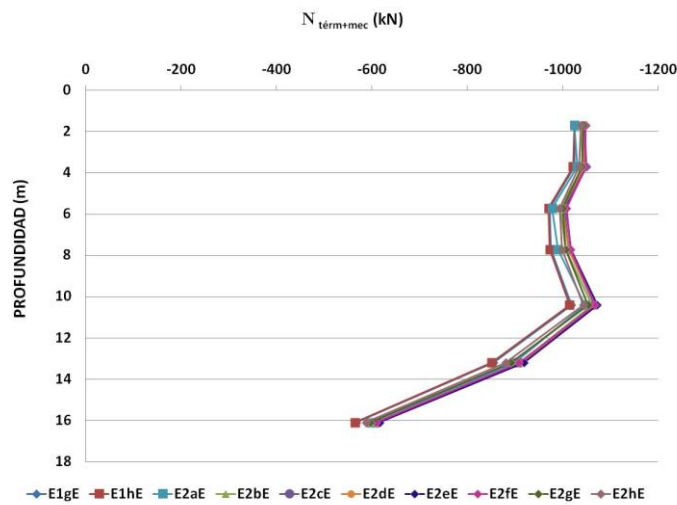


Figura VI-60: Evolución del incremento de carga total con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

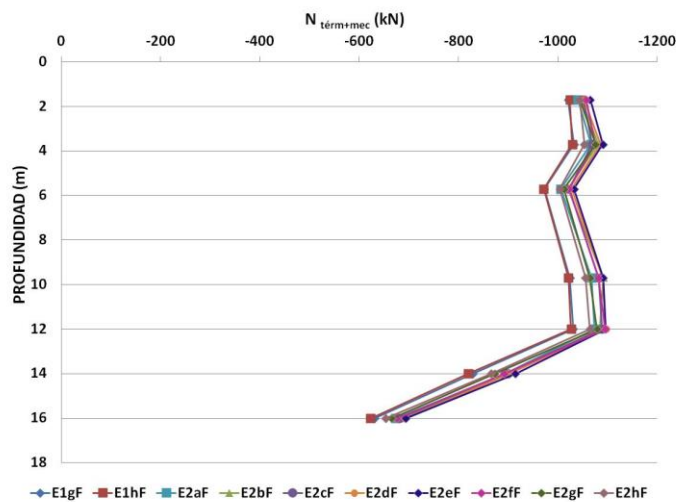


Figura VI-61: Evolución del incremento de carga total con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

VI.5.2 Resultados del ensayo E completo

El ensayo E completo se realizó entre los días 22/10/2013 y 4/11/2013, simulando las condiciones de funcionamiento de una oficina, en modo refrigeración (verano), durante 15 días consecutivos excepto los domingos, por no ser día laborable. La bomba geotérmica comienza a funcionar cada día a partir de las siete de la mañana y finaliza a las nueve de la noche, con una pausa a medio día.

VI.5.2.1 Temperaturas medidas en el interior del pilote

En las Figura VI-62 a Figura VI-69 se muestra la evolución de la temperatura con la profundidad en los ocho puntos de ensayo seleccionados, a lo largo de los 13 ciclos del ensayo E, desde el segundo ciclo hasta el ciclo 14. Los ciclos 6 y 13 (en rojo y línea discontinua en las figuras) corresponden a los domingos, y son, por tanto, ciclos “planos”, esto es, sin potencia inyectada.

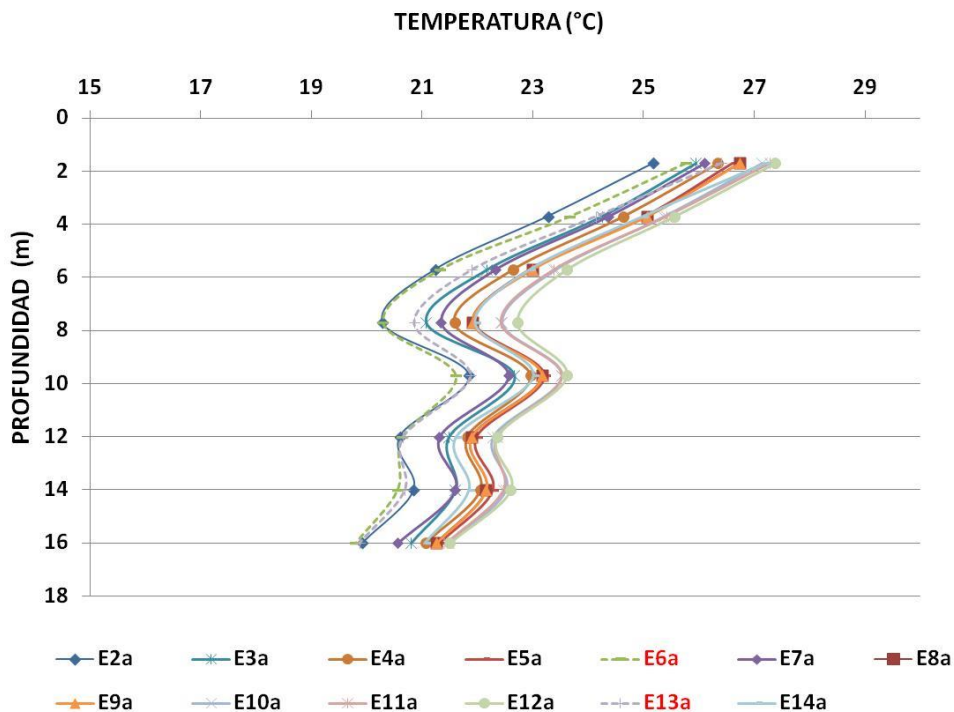


Figura VI-62. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto a.

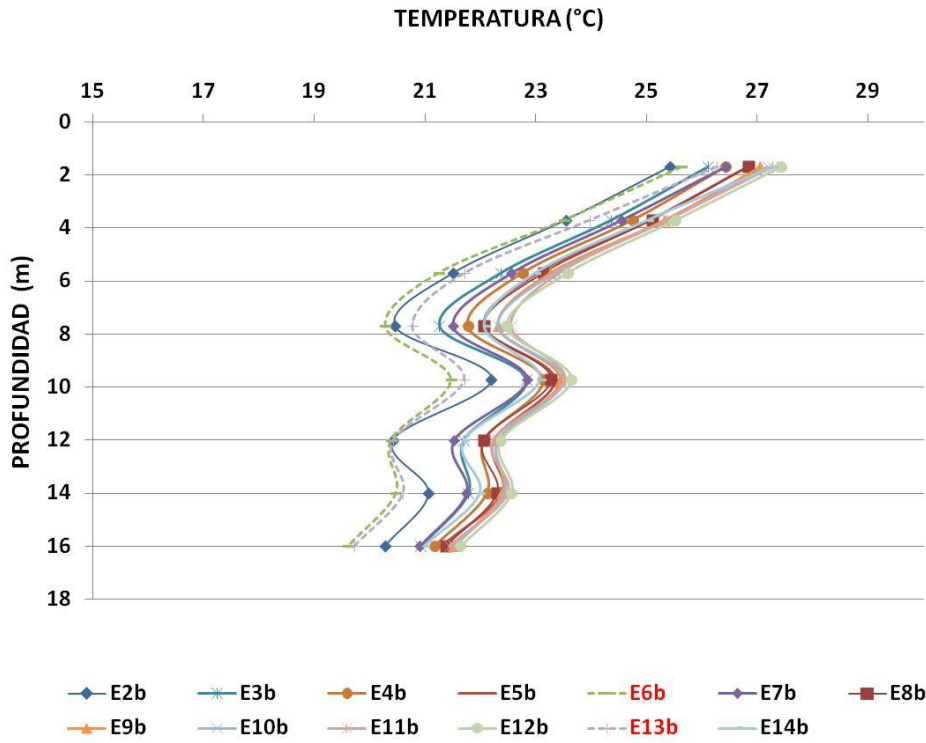


Figura VI-63. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto b.

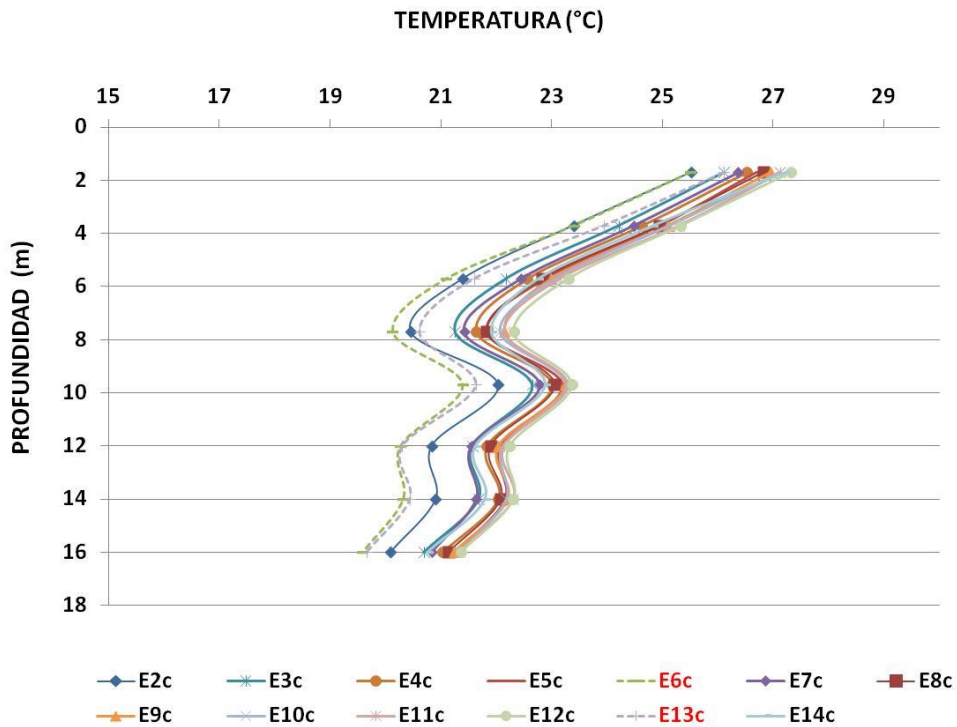


Figura VI-64. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto c.

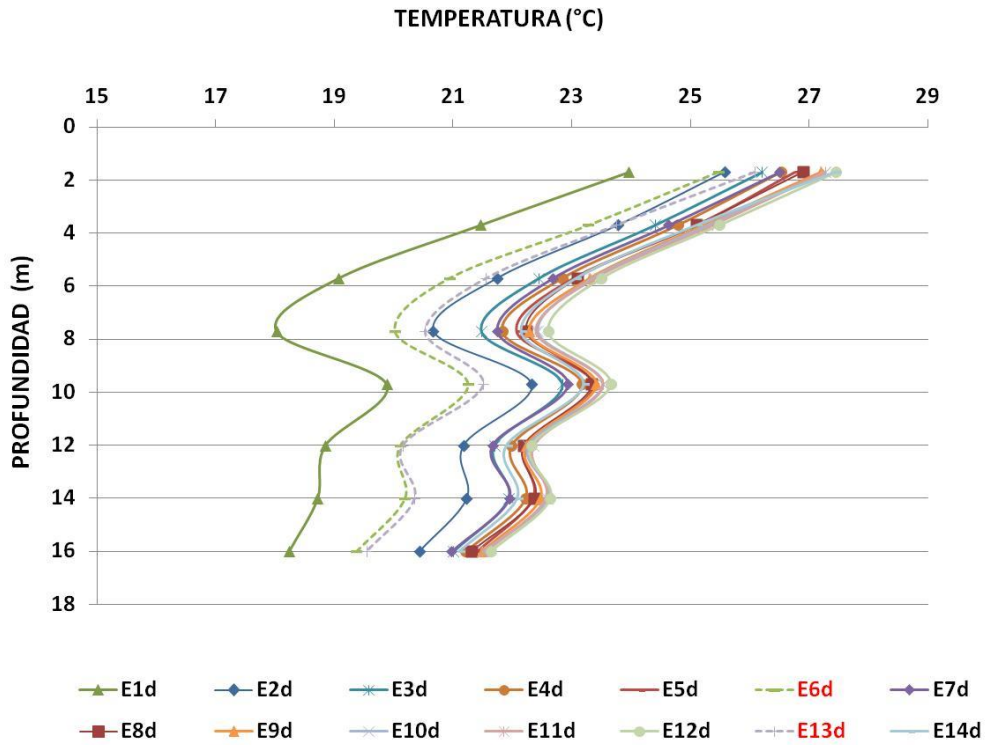


Figura VI-65. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto d.

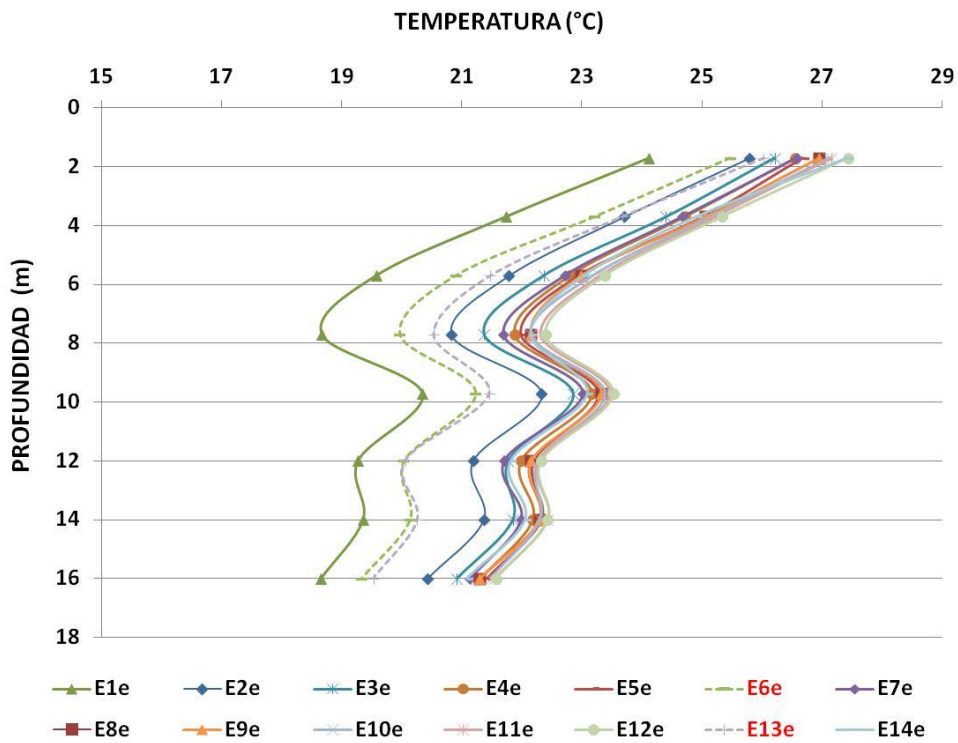


Figura VI-66. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto e.

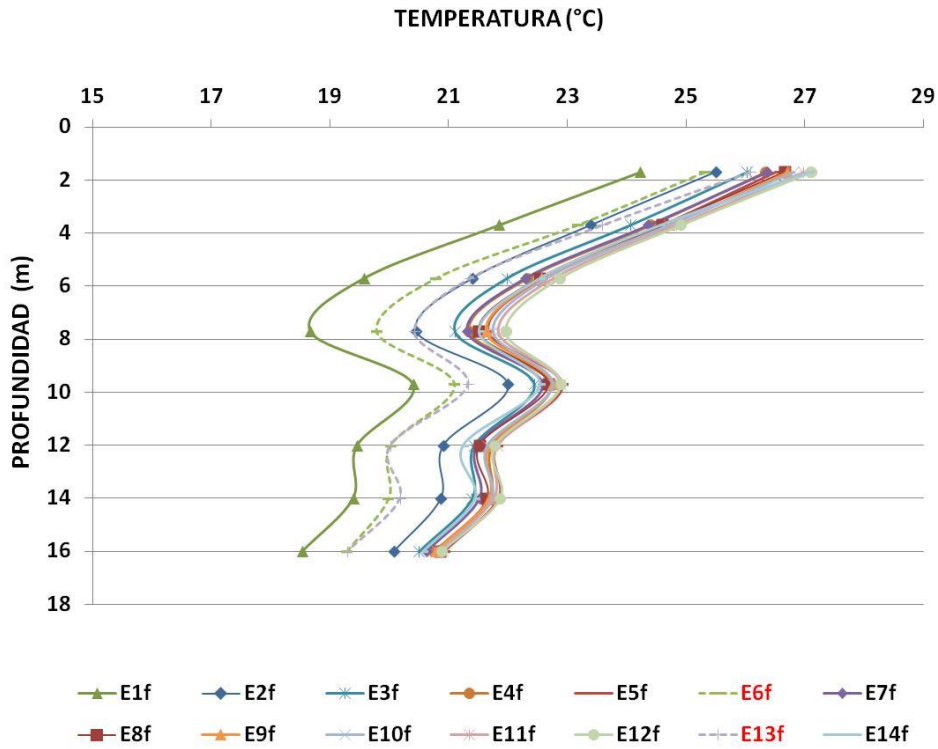


Figura VI-67. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto f.

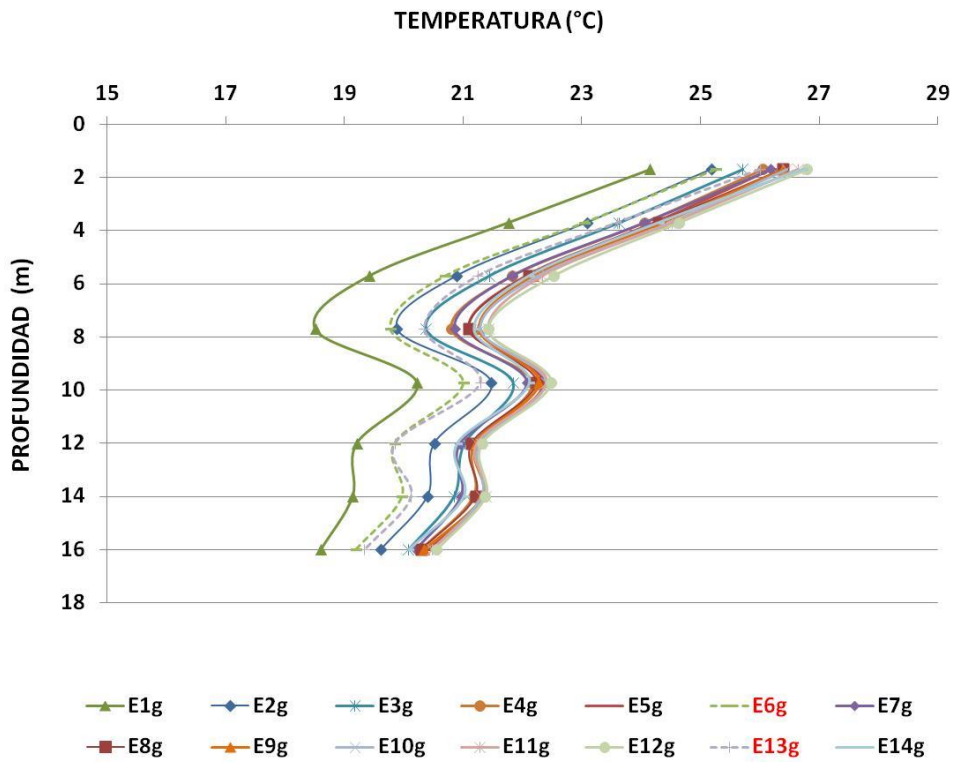


Figura VI-68. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto g.

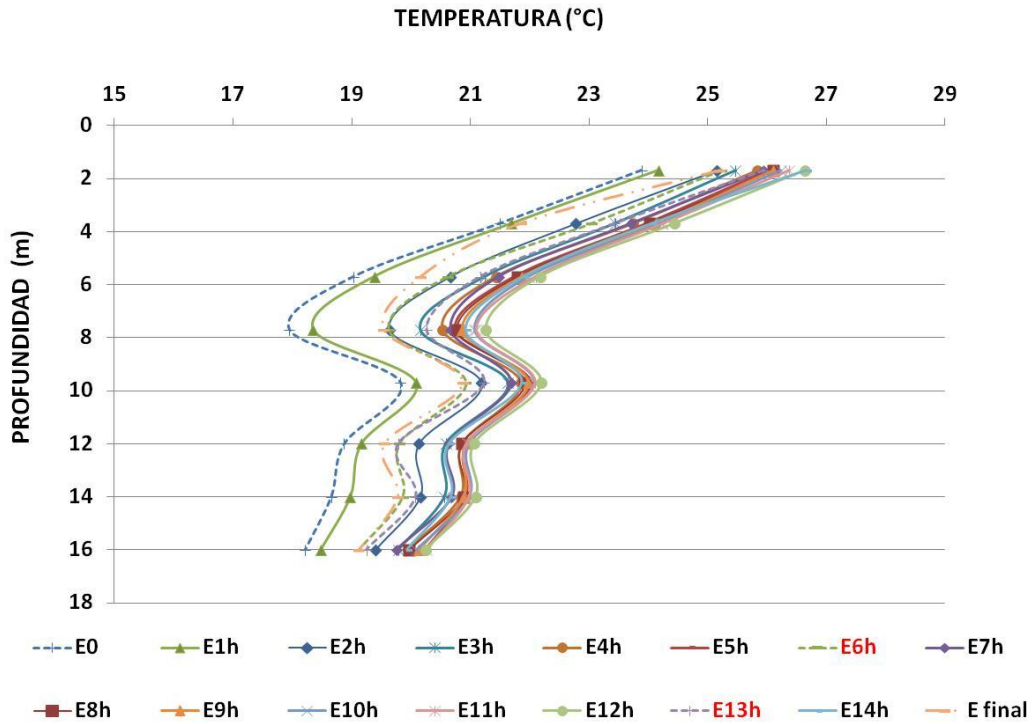


Figura VI-69. Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto h.

VI.5.2.2 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Los diferentes escalones de potencia inyectada inducen movimientos horizontales y verticales en la cabeza del pilote. Para medirlos, se utilizaron los LVDT's indicados en la Figura VI-70.

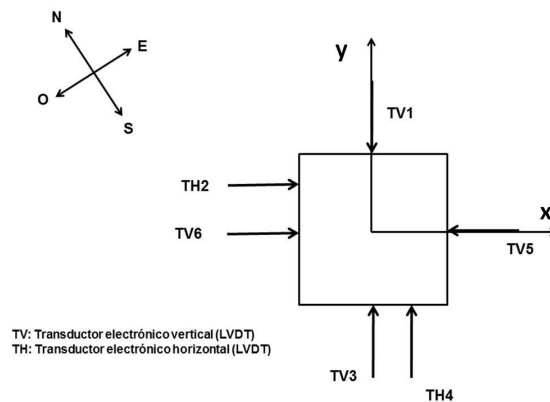


Figura VI-70. Esquema de disposición de los sensores en cabeza durante el ensayo E

En la Tabla VI-7 se recogen los movimientos experimentados en cabeza, en los ocho momentos estudiados durante los 15 ciclos del ensayo E.

Tabla VI-7. Resumen de movimientos experimentados en cabeza durante el ensayo E (mm)

Ciclo	Denominación	TV1	TH2	TV3	TH4	TV5	TV6
		$\Delta\delta_{1v}$	$\Delta\delta_{2h}$	$\Delta\delta_{3v}$	$\Delta\delta_{4h}$	$\Delta\delta_{5v}$	$\Delta\delta_{6v}$
Punto a							
2	E2a	0,17	0	0,18	-0,03	0,17	0,19
3	E3a	0,26	0,01	0,26	-0,05	0,24	0,28
4	E4a	0,3	0,03	0,3	-0,06	0,3	0,32
5	E5a	0,33	0,05	0,34	-0,06	0,33	0,36
6	E6a	0,2	-0,01	0,25	-0,09	0,26	0,21
7	E7a	0,3	0,01	0,29	-0,08	0,28	0,32
8	E8a	0,35	0,06	0,36	-0,06	0,36	0,38
9	E9a	0,34	0	0,35	-0,17	0,34	0,37
10	E10a	0,33	0	0,34	-0,22	0,34	0,38
11	E11a	0,34	0,01	0,34	-0,24	0,36	0,38
12	E12a	0,36	0,08	0,38	-0,22	0,39	0,41
13	E13a	0,22	0,06	0,3	-0,26	0,31	0,25
14	E14a	0,28	0,09	0,32	-0,24	0,33	0,31
Punto b							
2	E2b	0,18	0,06	0,19	-0,02	0,19	0,2
3	E3b	0,25	0,07	0,27	-0,04	0,26	0,27
4	E4b	0,29	0,09	0,3	-0,05	0,3	0,32
5	E5b	0,32	0,1	0,34	-0,05	0,34	0,35
6	E6b	0,18	0,05	0,2	-0,07	0,2	0,18
7	E7b	0,29	0,07	0,29	-0,07	0,29	0,31
8	E8b	0,36	0,09	0,38	-0,07	0,39	0,39
9	E9b	0,34	0,06	0,36	-0,16	0,37	0,38
10	E10b	0,33	0,06	0,35	-0,21	0,37	0,37
11	E11b	0,33	0,08	0,35	-0,22	0,37	0,38
12	E12b	0,34	0,15	0,37	-0,21	0,39	0,39
13	E13b	0,19	0,11	0,25	-0,24	0,26	0,22
14	E14b	0,28	0,12	0,32	-0,22	0,34	0,31
Punto c							
2	E2c	0,17	0,08	0,18	-0,01	0,17	0,18
3	E3c	0,24	0,1	0,26	-0,03	0,27	0,27
4	E4c	0,29	0,12	0,3	-0,04	0,3	0,31
5	E5c	0,3	0,13	0,32	-0,05	0,32	0,33
6	E6c	0,17	0,11	0,19	-0,04	0,19	0,19
7	E7c	0,29	0,12	0,31	-0,06	0,31	0,31
8	E8c	0,33	0,11	0,37	-0,07	0,37	0,37
9	E9c	0,33	0,11	0,37	-0,15	0,38	0,38
10	E10c	0,33	0,13	0,37	-0,19	0,39	0,39
11	E11c	0,34	0,14	0,38	-0,21	0,39	0,39

12	E12c	0,34	0,19	0,39	-0,21	0,41	0,38
13	E13c	0,19	0,15	0,23	-0,22	0,24	0,21
14	E14c	0,27	0,16	0,32	-0,22	0,33	0,31
Punto d							
1	E1d	0	-0,01	0,02	0	0,01	0
2	E2d	0,22	0,12	0,22	-0,01	0,21	0,24
3	E3d	0,29	0,14	0,28	-0,02	0,27	0,31
4	E4d	0,32	0,14	0,31	-0,03	0,31	0,33
5	E5d	0,33	0,16	0,34	-0,04	0,34	0,37
6	E6d	0,19	0,13	0,21	-0,04	0,2	0,2
7	E7d	0,33	0,15	0,32	-0,04	0,32	0,35
8	E8d	0,37	0,11	0,39	-0,07	0,38	0,4
9	E9d	0,37	0,13	0,37	-0,15	0,38	0,41
10	E10d	0,37	0,15	0,37	-0,19	0,38	0,41
11	E11d	0,36	0,17	0,38	-0,2	0,39	0,41
12	E12d	0,37	0,23	0,41	-0,2	0,42	0,43
13	E13d	0,17	0,17	0,22	-0,21	0,22	0,2
14	E14d	0,3	0,16	0,33	-0,22	0,35	0,33
Punto e							
1	E1e	0,03	0,01	0,05	0	0,03	0,03
2	E2e	0,22	0,1	0,23	-0,02	0,23	0,23
3	E3e	0,27	0,1	0,28	-0,04	0,28	0,29
4	E4e	0,31	0,12	0,32	-0,04	0,32	0,33
5	E5e	0,33	0,12	0,34	-0,05	0,34	0,35
6	E6e	0,18	0,1	0,21	-0,05	0,21	0,18
7	E7e	0,32	0,13	0,33	-0,05	0,33	0,34
8	E8e	0,35	0,07	0,39	-0,09	0,39	0,39
9	E9e	0,34	0,1	0,37	-0,16	0,38	0,39
10	E10e	0,35	0,13	0,37	-0,2	0,39	0,4
11	E11e	0,36	0,15	0,37	-0,21	0,39	0,4
12	E12e	0,36	0,2	0,41	-0,21	0,42	0,41
13	E13e	0,16	0,15	0,21	-0,22	0,22	0,18
14	E14e	0,3	0,15	0,34	-0,23	0,35	0,33
Punto f							
1	E1f	0,03	-0,01	0,06	-0,01	0,05	0,03
2	E2f	0,18	0,06	0,22	-0,03	0,22	0,2
3	E3f	0,23	0,07	0,28	-0,05	0,27	0,25
4	E4f	0,27	0,09	0,31	-0,05	0,3	0,29
5	E5f	0,28	0,08	0,33	-0,07	0,33	0,31
6	E6f	0,16	0,06	0,21	-0,06	0,21	0,17
7	E7f	0,29	0,09	0,33	-0,07	0,32	0,31
8	E8f	0,32	0,02	0,39	-0,11	0,37	0,35
9	E9f	0,3	0,04	0,37	-0,18	0,38	0,35
10	E10f	0,3	0,07	0,37	-0,22	0,38	0,35
11	E11f	0,32	0,12	0,37	-0,22	0,39	0,36

12	E12f	0,32	0,15	0,4	-0,23	0,42	0,36
13	E13f	0,15	0,11	0,22	-0,24	0,22	0,17
14	E14f	0,26	0,13	0,33	-0,23	0,34	0,29
Punto g							
1	E1g	0,02	-0,02	0,06	-0,02	0,05	0,03
2	E2g	0,15	0,02	0,2	-0,05	0,19	0,16
3	E3g	0,2	0,04	0,25	-0,05	0,24	0,22
4	E4g	0,23	0,05	0,28	-0,07	0,27	0,24
5	E5g	0,25	0,05	0,31	-0,07	0,3	0,27
6	E6g	0,15	0,02	0,21	-0,08	0,2	0,16
7	E7g	0,26	0,06	0,31	-0,08	0,31	0,28
8	E8g	0,27	-0,02	0,34	-0,13	0,34	0,31
9	E9g	0,27	-0,01	0,32	-0,19	0,31	0,3
10	E10g	0,26	0,03	0,32	-0,23	0,32	0,3
11	E11g	0,27	0,08	0,34	-0,24	0,34	0,3
12	E12g	0,13	0,08	0,21	-0,24	0,22	0,15
13	E13g	0,23	0,12	0,29	-0,24	0,3	0,25
14	E14g	0,32	0,18	0,35	-0,22	0,37	0,36
Punto h							
1	E1h	0,02	-0,04	0,06	-0,02	0,04	0,02
2	E2h	0,12	-0,01	0,18	-0,06	0,17	0,13
3	E3h	0,17	0,01	0,23	-0,07	0,23	0,19
4	E4h	0,2	0,02	0,26	-0,07	0,26	0,22
5	E5h	0,23	0,03	0,28	-0,08	0,28	0,25
6	E6h	0,15	-0,02	0,2	-0,09	0,2	0,15
7	E7h	0,22	0,02	0,29	-0,09	0,28	0,25
8	E8h	0,23	-0,04	0,31	-0,16	0,29	0,26
9	E9h	0,24	-0,03	0,29	-0,21	0,3	0,27
10	E10h	0,24	-0,01	0,3	-0,24	0,3	0,27
11	E11h	0,23	0,06	0,3	-0,25	0,31	0,27
12	E12h	0,25	0,11	0,34	-0,25	0,35	0,29
13	E13h	0,13	0,05	0,21	-0,25	0,21	0,14
14	E14h	0,2	0,12	0,26	-0,23	0,29	0,23

Movimientos verticales

La Figura VI-71 muestra la evolución de los movimientos verticales con el tiempo a lo largo del ensayo E. Se observa una tendencia ascendente durante los primeros días del ensayo. La segunda semana se registran los máximos valores de desplazamiento vertical (0,43 mm). Los últimos días la tendencia es descendente. Los domingos, no laborables, se reconocen por los mínimos movimientos verticales en la cabeza del pilote.

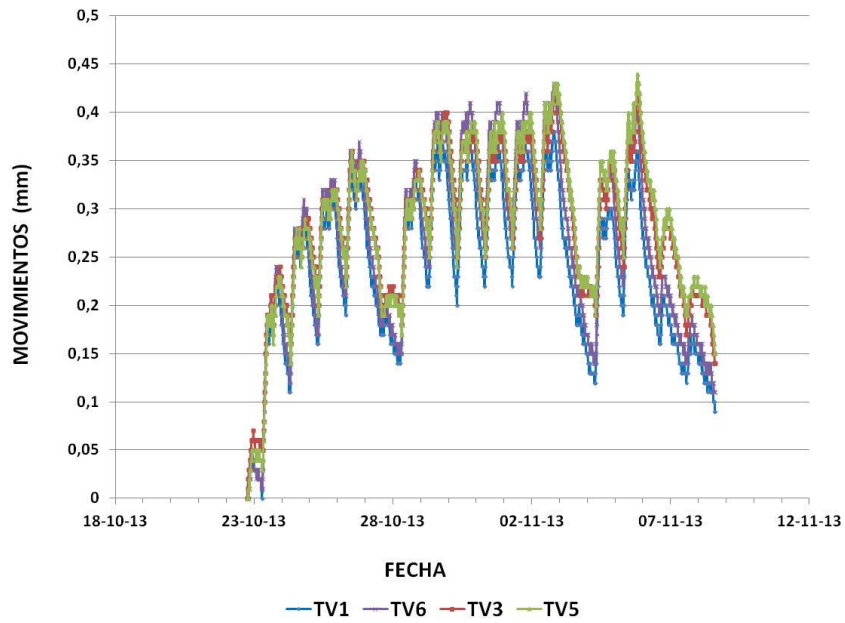


Figura VI-71. Movimientos verticales durante el ensayo E

Movimientos horizontales

En la Figura VI-72 se muestra la evolución de los movimientos horizontales con el tiempo a lo largo del ensayo E.

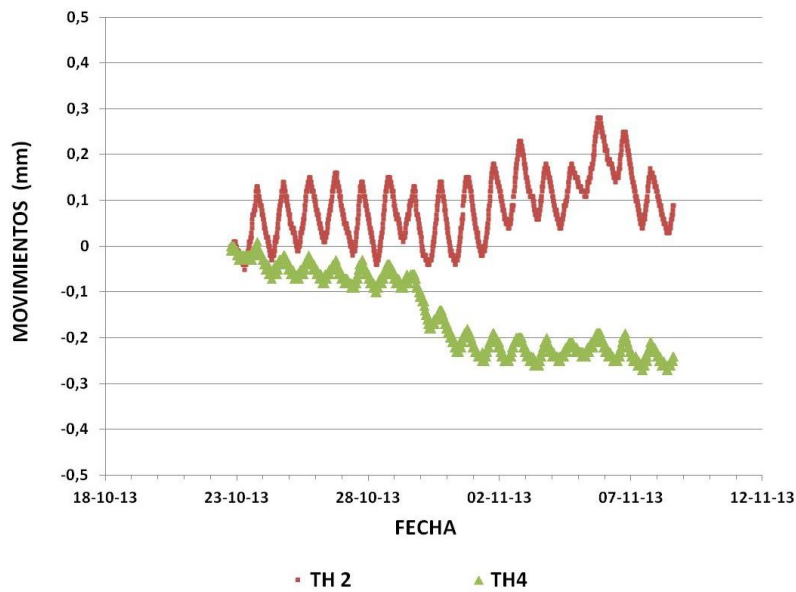


Figura VI-72. Movimientos horizontales durante el ensayo E.

Los movimientos horizontales experimentados son principalmente debidos al efecto de la variación diaria cíclica de la temperatura en la superficie. El signo positivo de los movimientos del transductor TH2 y negativos del transductor TH4 indican un desplazamiento de la cabeza del pilote en la dirección Sur-sudeste. A partir del octavo día de ensayo los movimientos horizontales se registrados por el transductor TH4 son algo mayores.

VI.5.2.3 Deformaciones medidas en el interior del pilote

Se exponen a continuación los datos arrojados por los dos tipos de sensores utilizados. Es importante recordar que, como en apartados anteriores, los extensómetros registran la deformación observada (ϵ_{obs}), mientras que los sensores de fibra óptica miden directamente la deformación no desarrollada ($\epsilon_{no\ desarrollado}$).

Extensómetros: Deformación observada.

Las Figura VI-73 a Figura VI-80 muestran la evolución de las deformaciones observadas, medidas por los extensómetros de cuerda vibrante a cada profundidad, debida a los cambios de temperatura que se producen, respectivamente, en los ocho puntos estudiados a lo largo de los 13 ciclos completos del ensayo E, desde el 2º al 14º. Las deformaciones observadas son de signo positivo, describiendo una dilatación del pilote por efecto de la inyección de calor. Ha sido para facilitar el análisis de la evolución del comportamiento a lo largo de todo el ensayo E, por lo que se han agrupado en sendas figuras las lecturas correspondientes a los diferentes puntos del ciclo tipo (ver Figura VI-45) puntos “a” a “h”. El origen corresponde al momento E0.

Las dilataciones máximas se registran en el momento “a” de todos los ciclos (Figura VI-73), que corresponde a las 11:00 de la mañana, tras 4 horas de inyección de la máxima potencia térmica del día, 80W/m. Por otro lado, se observa en todas las figuras que las menores deformaciones se registraron durante los ciclos 6 y 13, que corresponden a domingos, no laborables, durante los que no se activó el sistema geotérmico. Finalmente, se observa que las deformaciones máximas se miden en los extensómetros situados a 6 y 8 metros de profundidad.

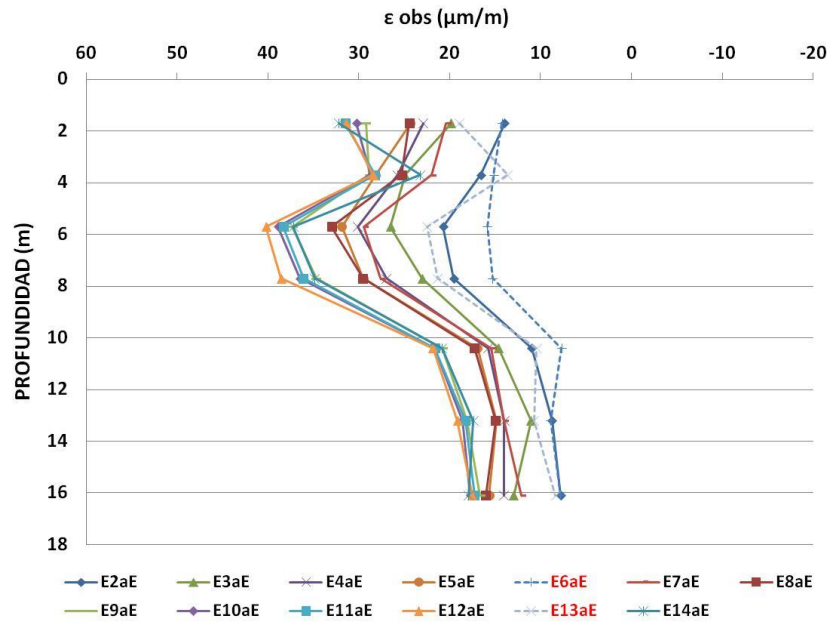


Figura VI-73: Evolución de la deformación observada en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

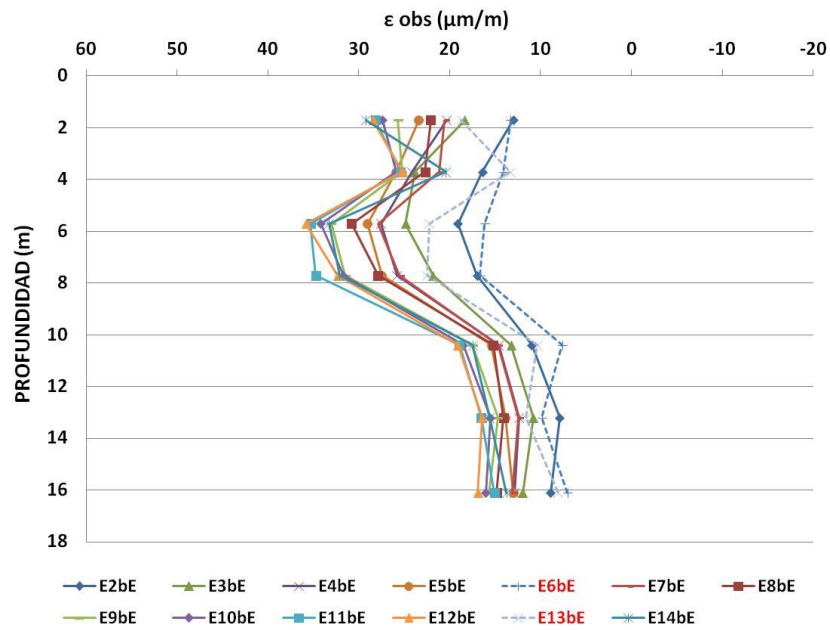


Figura VI-74: Evolución de la deformación observada en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

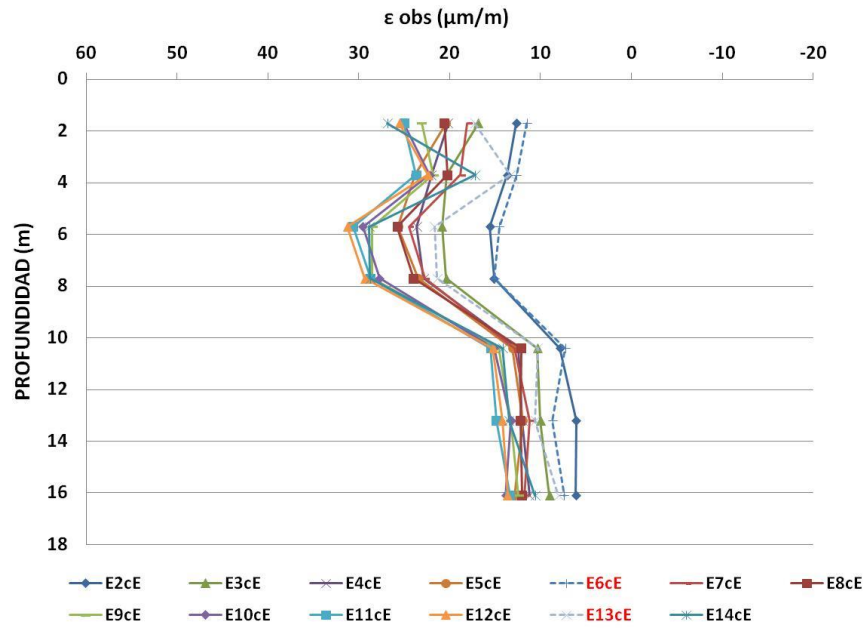


Figura VI-75: Evolución de la deformación observada en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

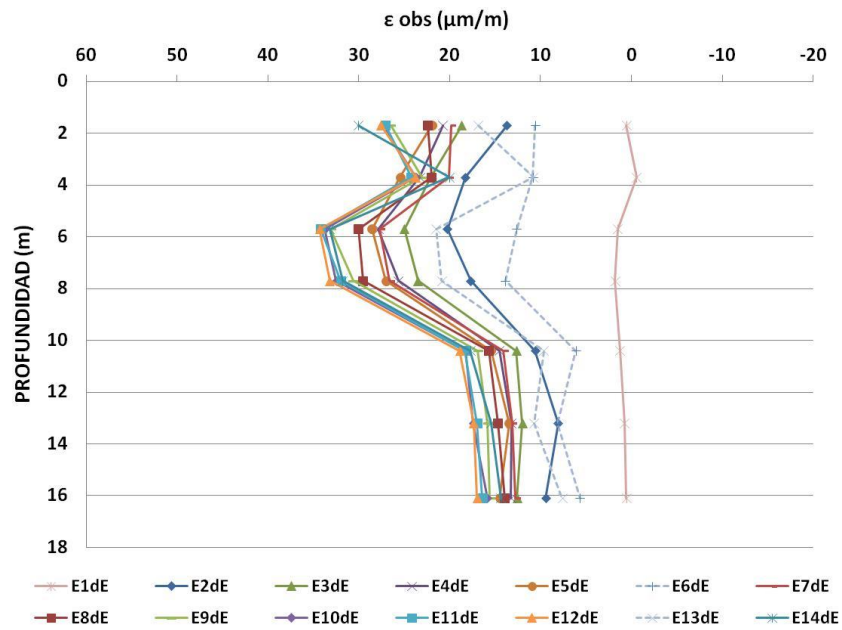


Figura VI-76: Evolución de la deformación observada en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

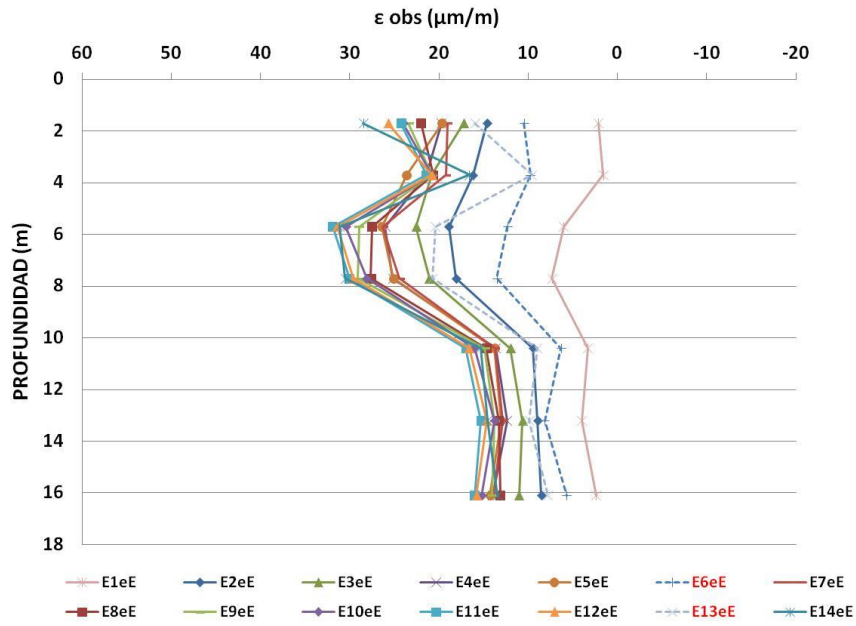


Figura VI-77: Evolución de la deformación observada en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

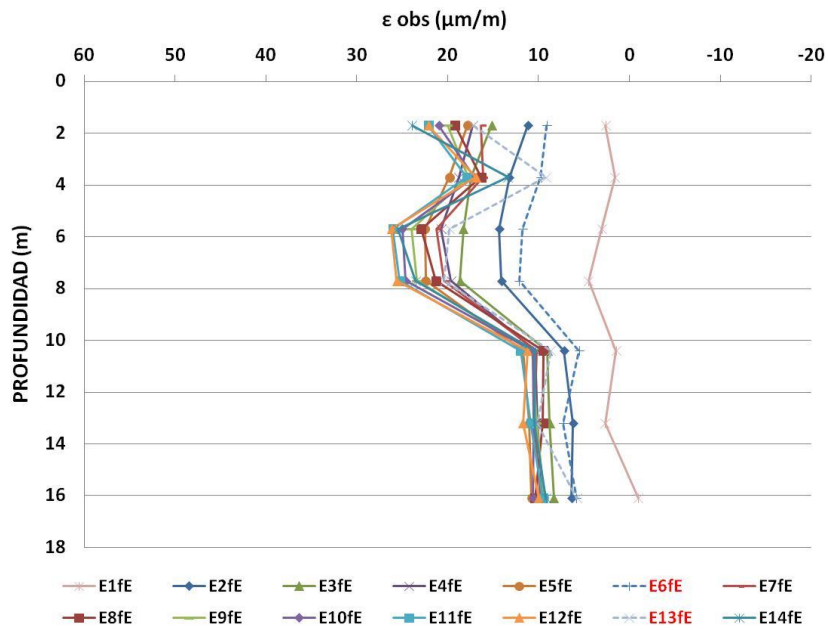


Figura VI-78: Evolución de la deformación observada en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

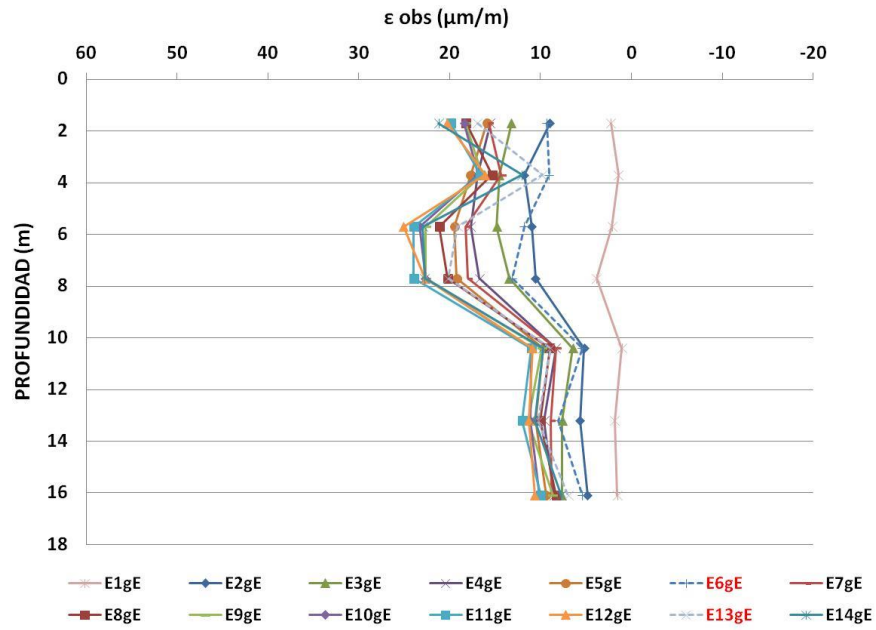


Figura VI-79: Evolución de la deformación observada en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

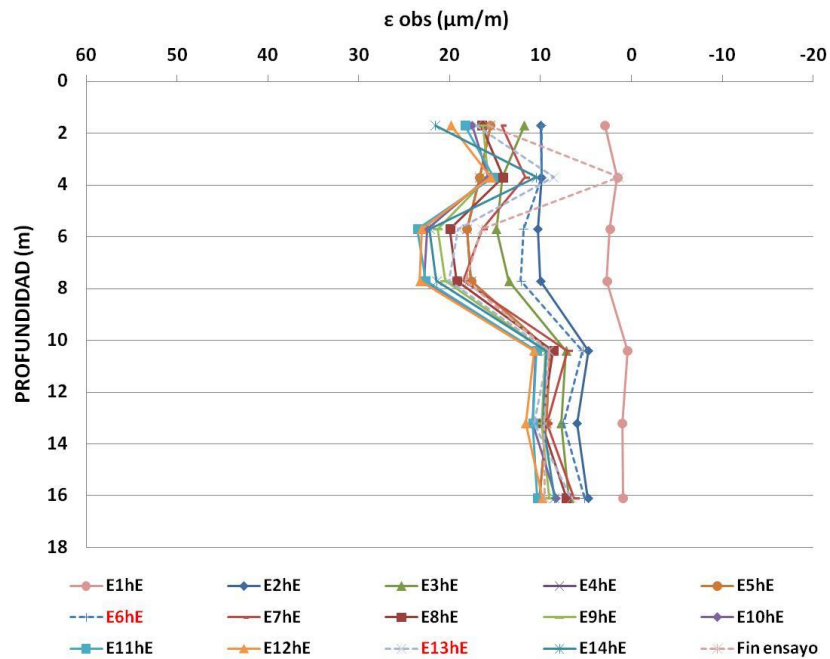


Figura VI-80: Evolución de la deformación observada en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

Fibra Óptica: Deformación no desarrollada

La deformación no desarrollada, medida por los sensores de fibra óptica, se puede observar en las Figura VI-81 a Figura VI-88 correspondientes a los puntos “a” a “h”, respectivamente. En todas las curvas las deformaciones están referidas al momento E0, que constituye el 0 de las gráficas.

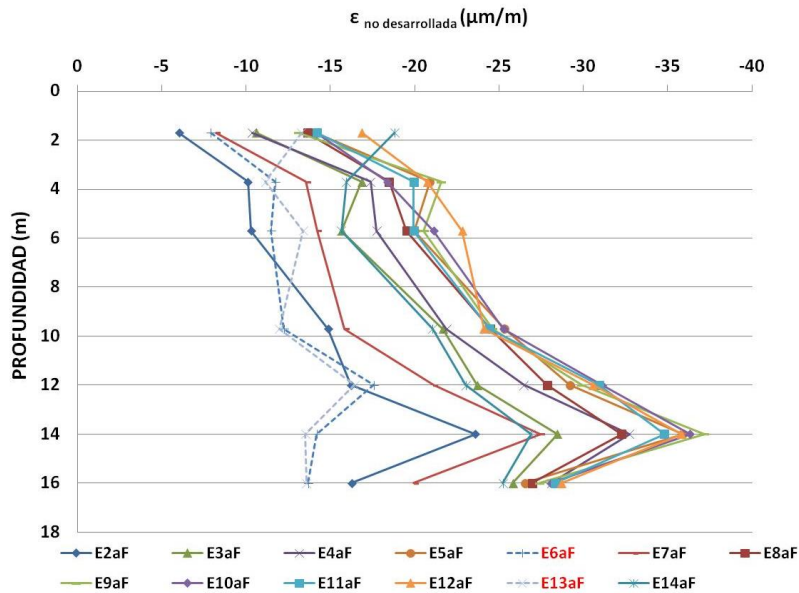


Figura VI-81: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

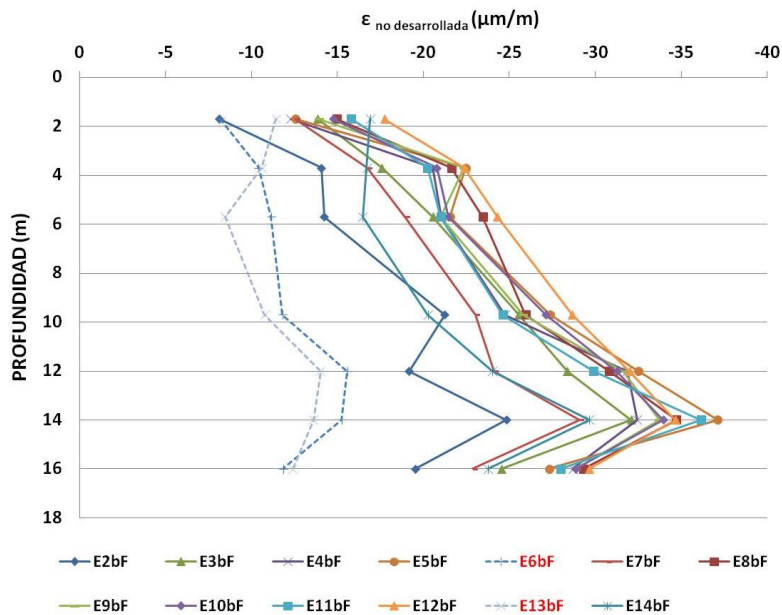


Figura VI-82: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

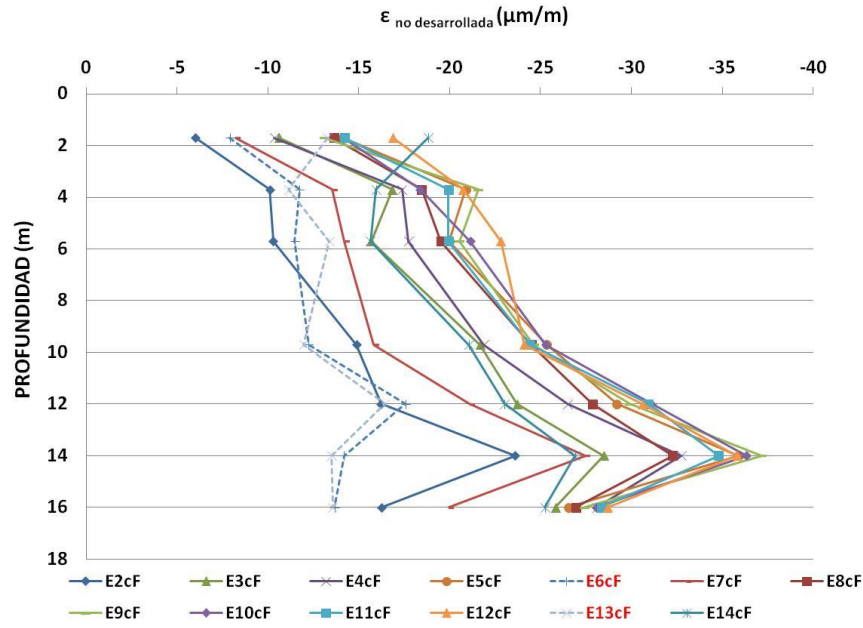


Figura VI-83: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

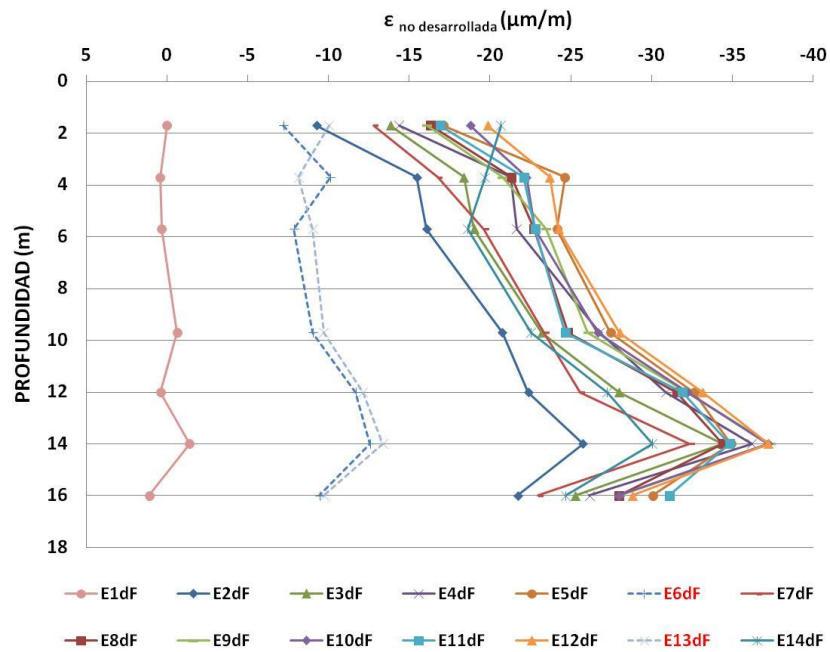


Figura VI-84: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

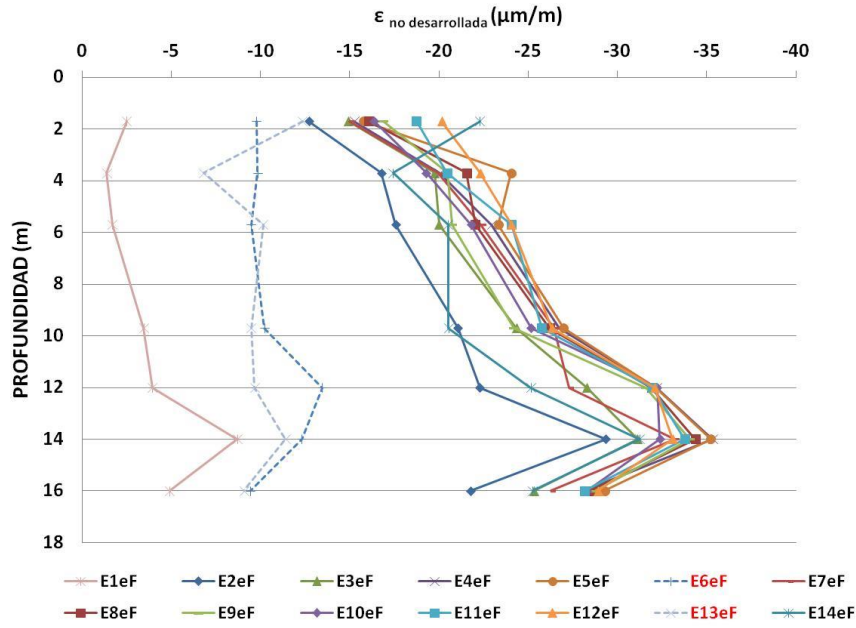


Figura VI-85: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

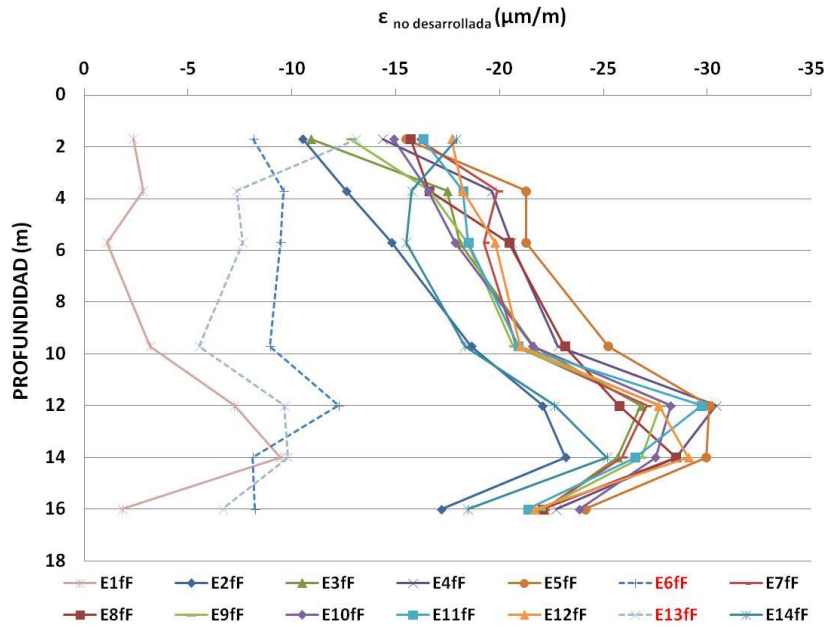


Figura VI-86: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

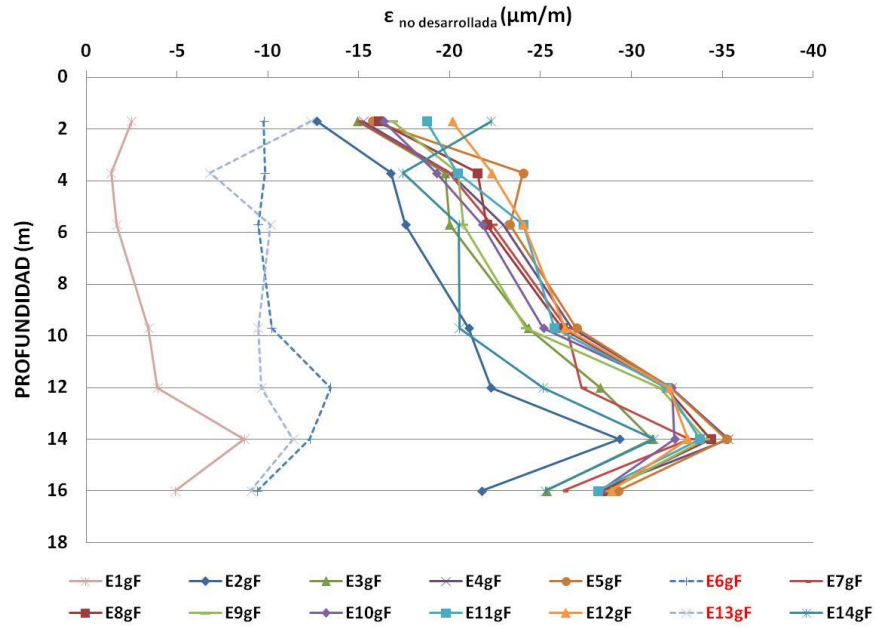


Figura VI-87: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

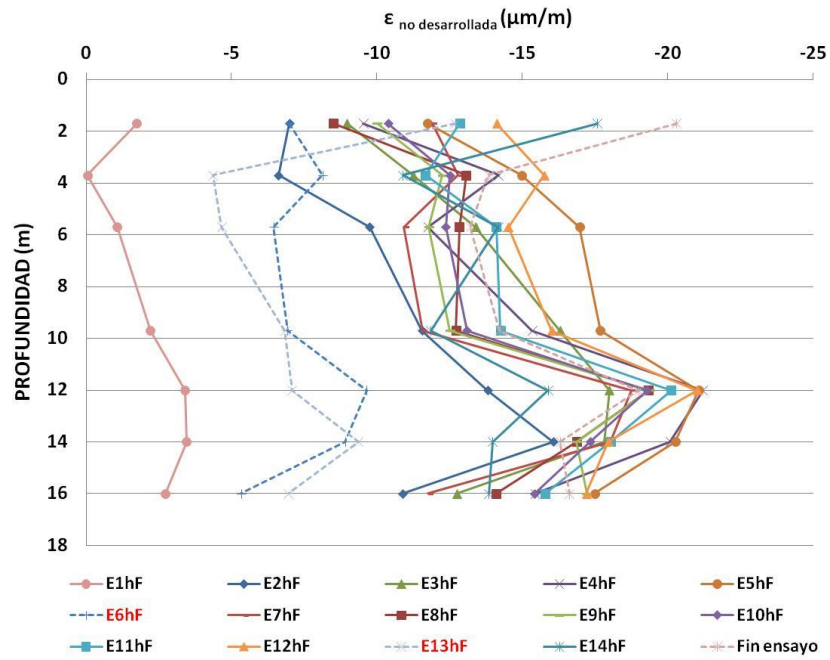


Figura VI-88: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

VI.5.2.4 Tensiones en el interior del pilote

Incrementos de tensión interna de origen térmico

La evolución a lo largo del ensayo E de las curvas de distribución de los incrementos de tensión interna de origen térmico, a partir de los datos que arrojan los extensómetros y los sensores de fibra óptica, se muestra en las Figura VI-89 a Figura VI-104. Se ordenan las figuras por punto del ciclo y por tipo de sensor. El origen de lecturas corresponde al momento E0.

Al igual que fue comentado al presentar los resultados del ciclo 2, en general, en todos los ciclos las deformaciones estimadas mediante los sensores de fibra óptica son superiores a los estimados mediante los extensómetros. La evolución temporal es, sin embargo, semejante.

La distribución en profundidad de los incrementos de tensión es, en general, también semejante, excluyendo el pico de tensión que se aprecia a los 4m de profundidad en las curvas obtenidas a partir de los extensómetros, que no se observa, al menos, tan claramente, en las curvas proporcionadas por la fibra óptica.

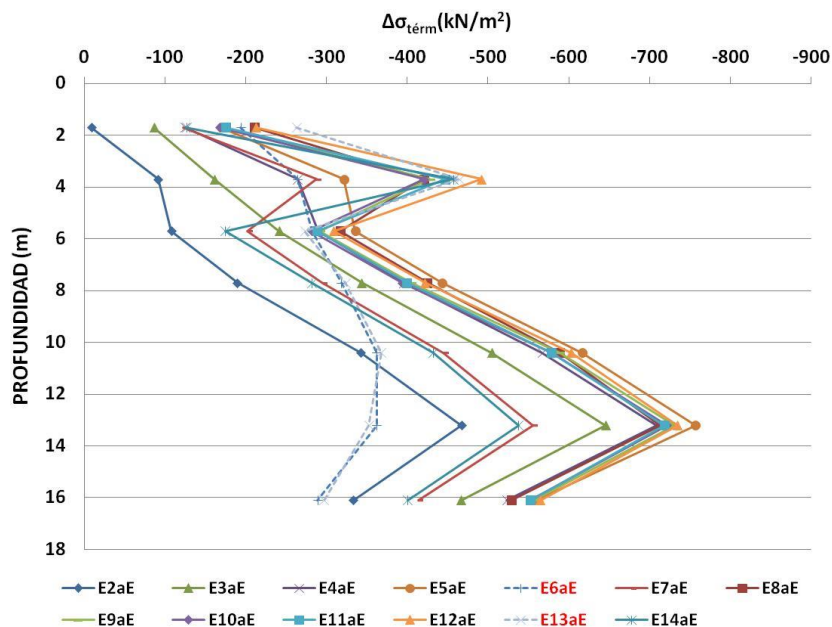


Figura VI-89: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

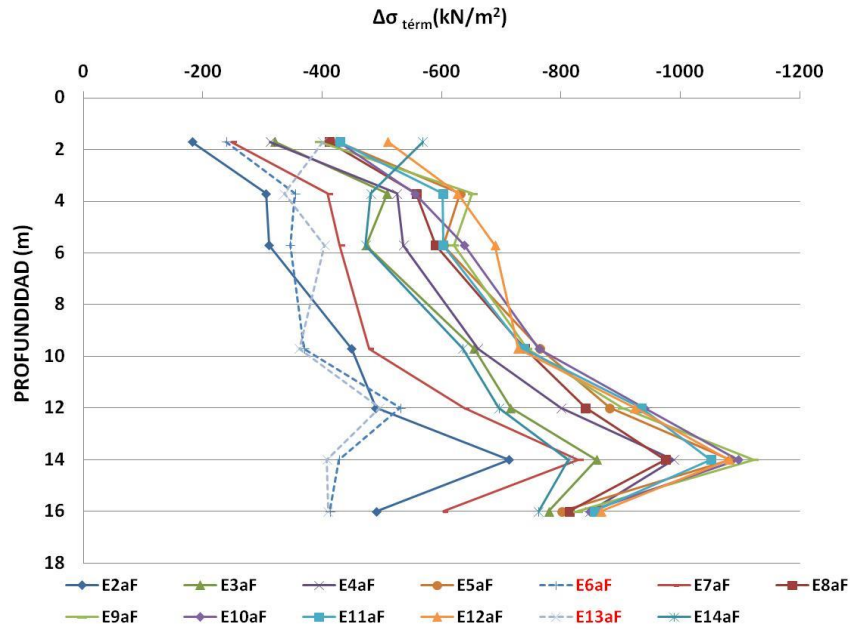


Figura VI-90: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

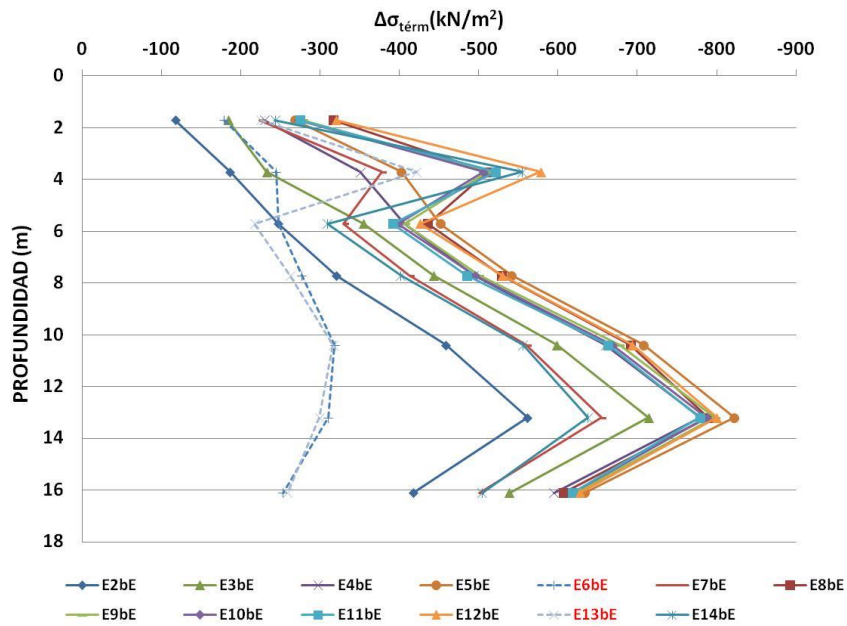


Figura VI-91: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

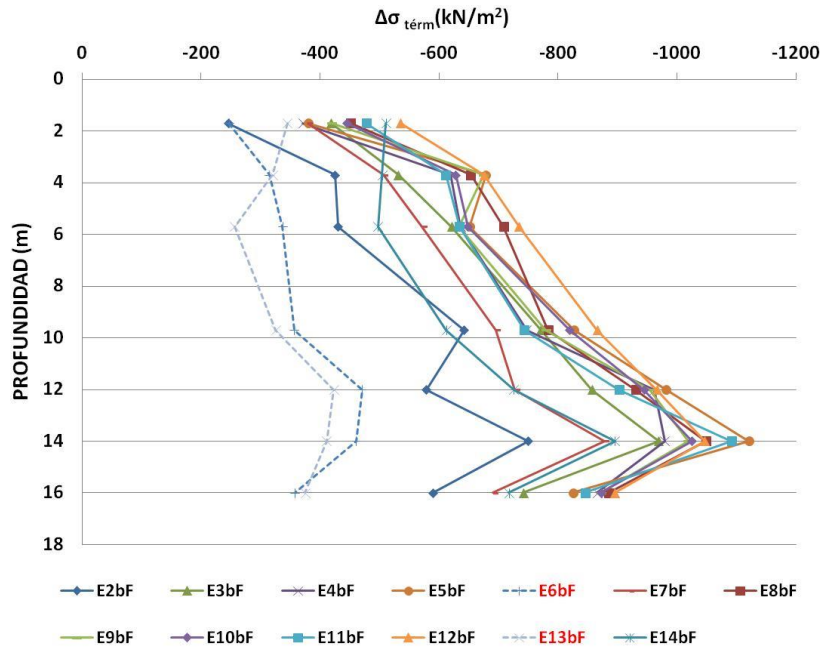


Figura VI-92: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

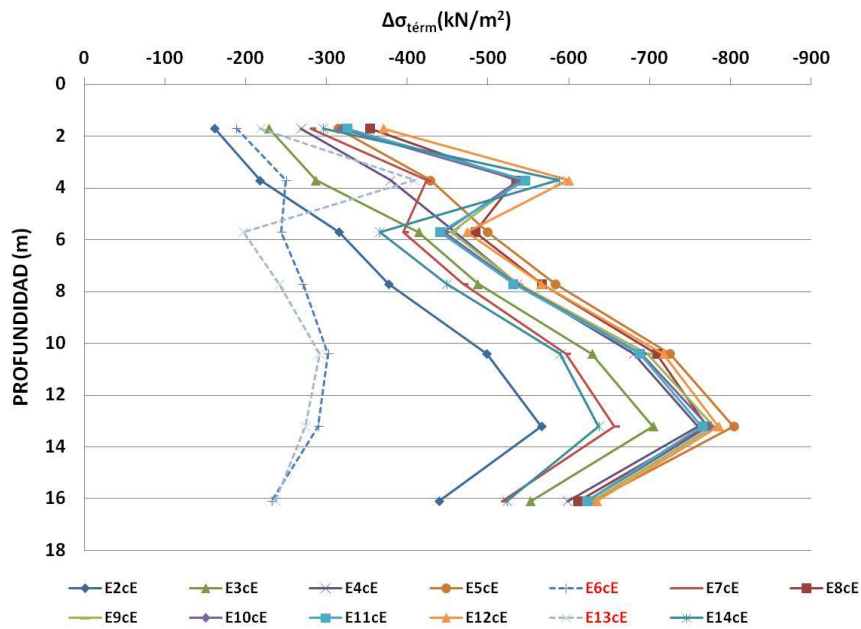


Figura VI-93: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

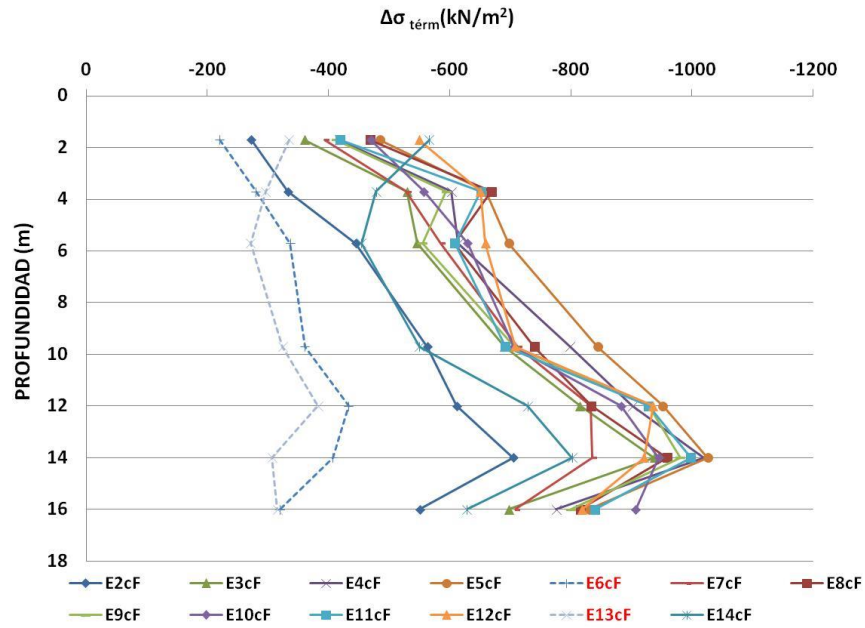


Figura VI-94: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

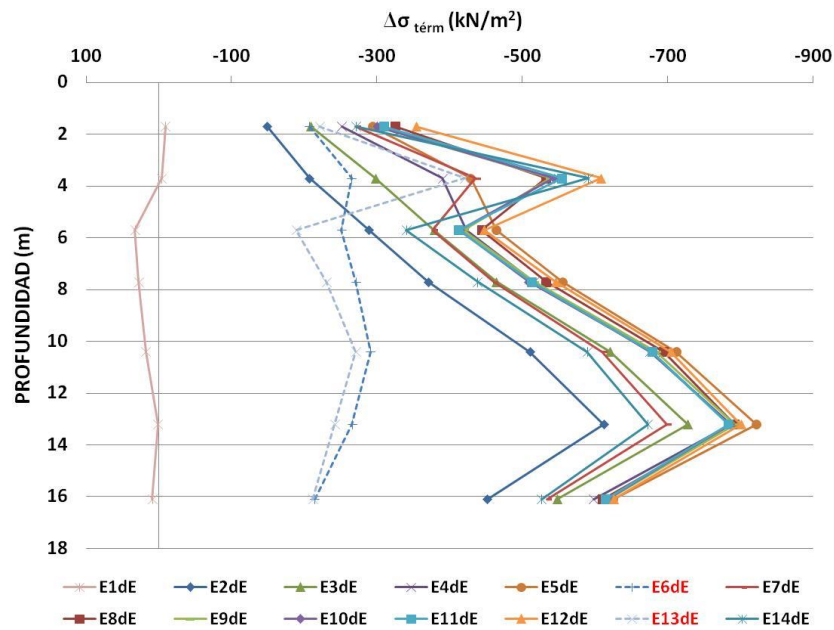


Figura VI-95: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

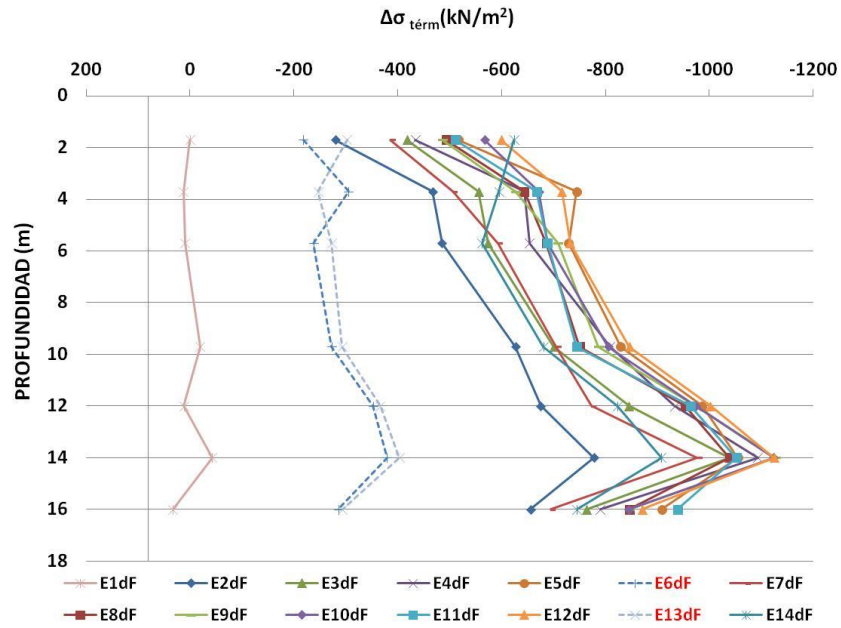


Figura VI-96: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

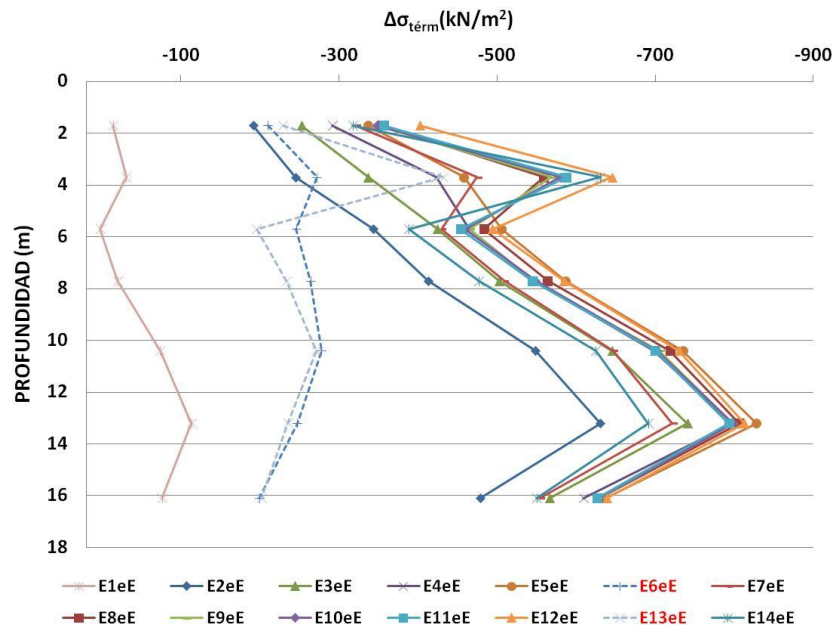


Figura VI-97: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

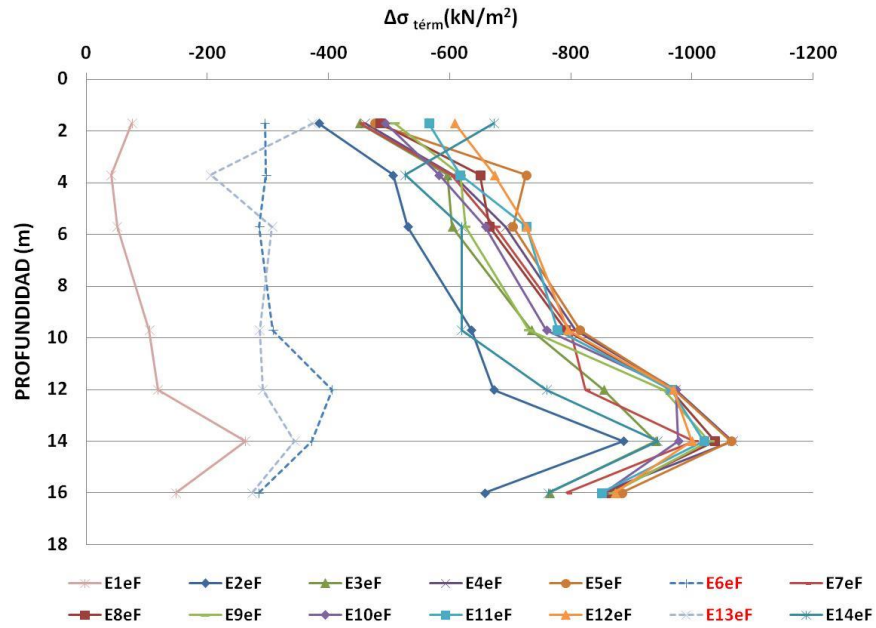


Figura VI-98: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

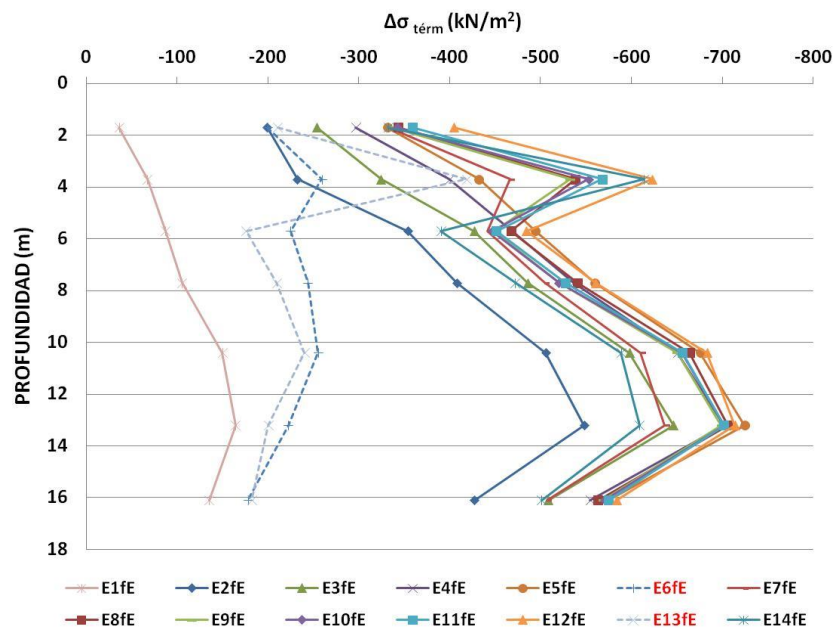


Figura VI-99: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

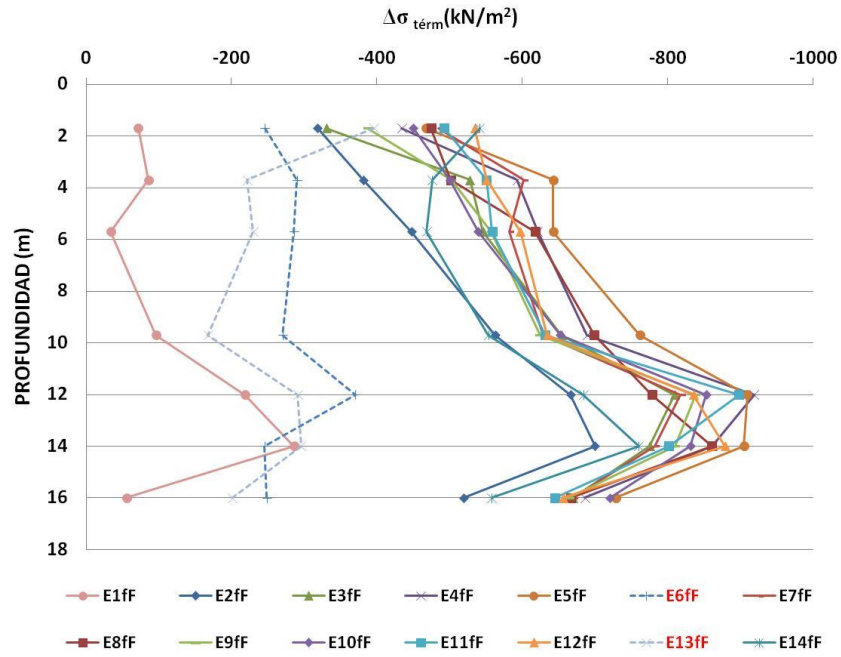


Figura VI-100: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

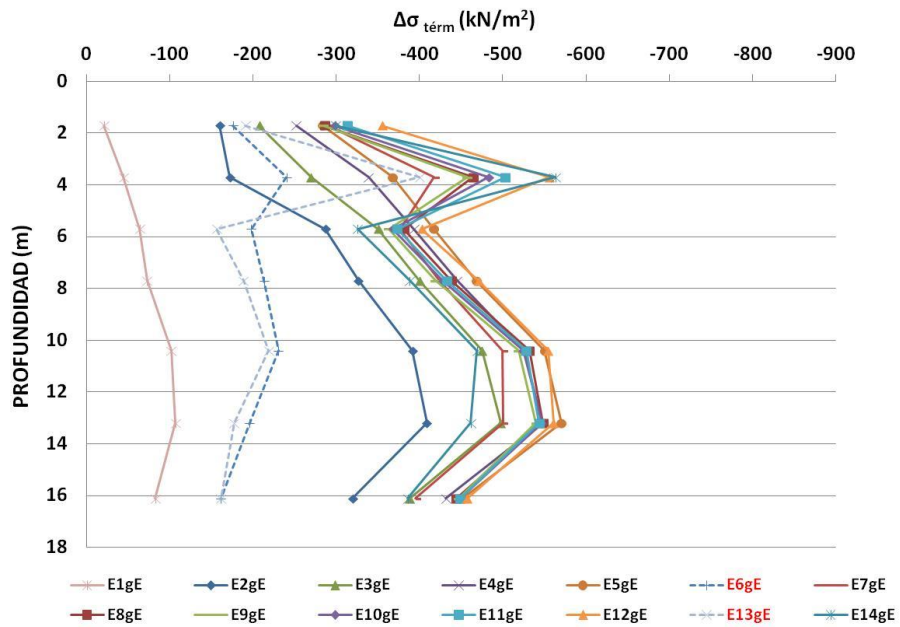


Figura VI-101: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

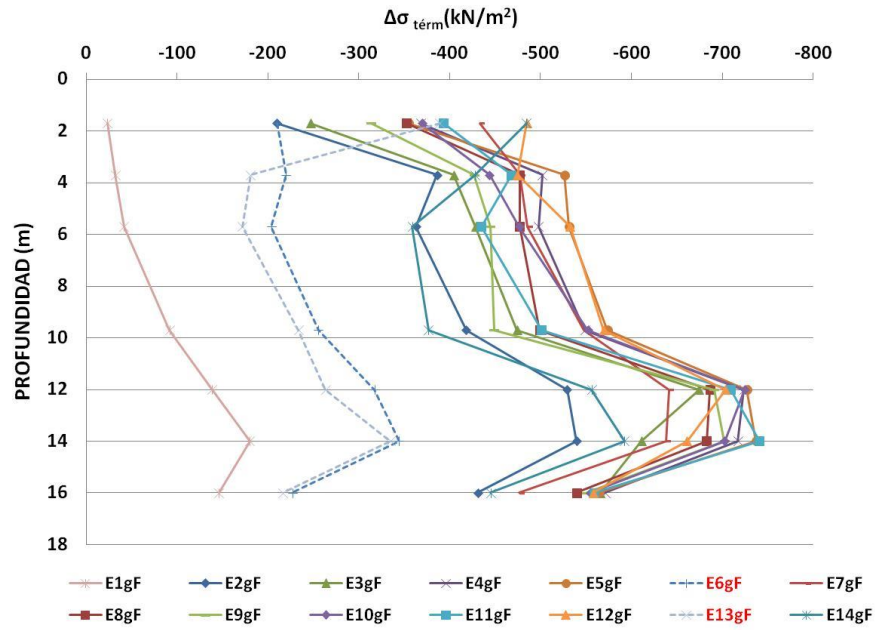


Figura VI-102: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

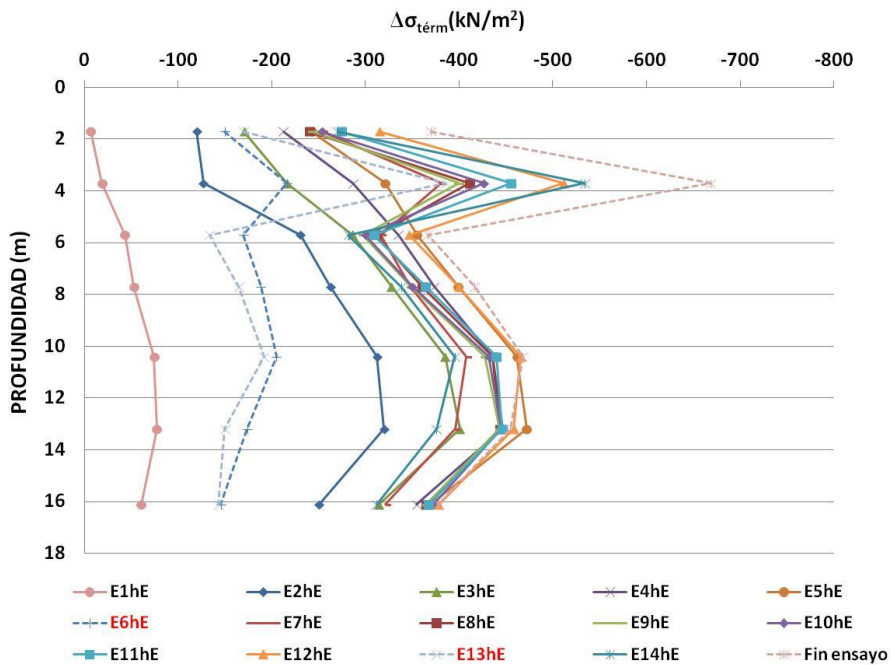


Figura VI-103: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

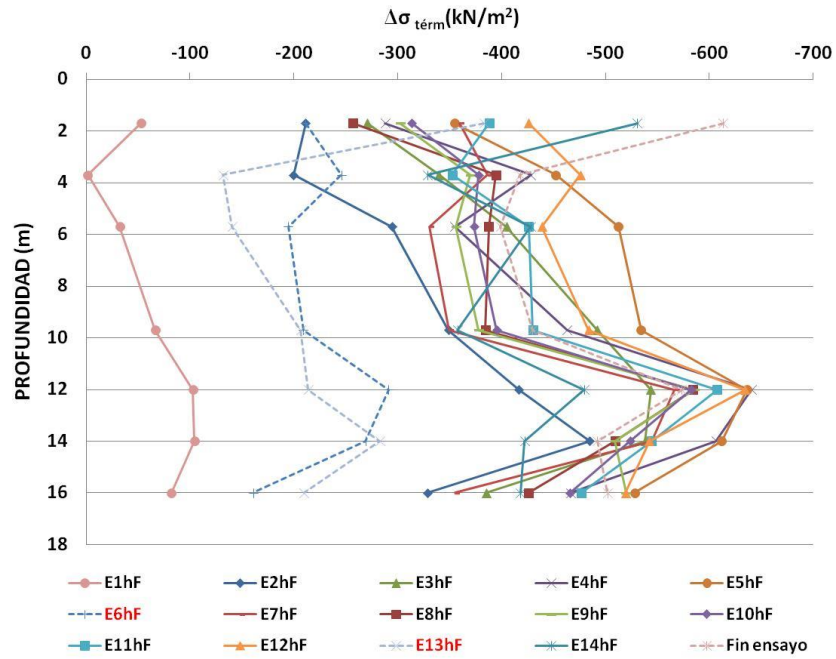


Figura VI-104: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

Tensiones totales

En la Figura VI-105 y Figura VI-106 se muestran las curvas de distribución de la tensión total (mecánica más térmica) en el punto “a” (de mayor inyección de potencia) de los diferentes ciclos, determinados, respectivamente, a partir de los extensómetros y de la fibra óptica. En el anejo XX se recogen las curvas correspondientes a todos los puntos de cada ciclo.

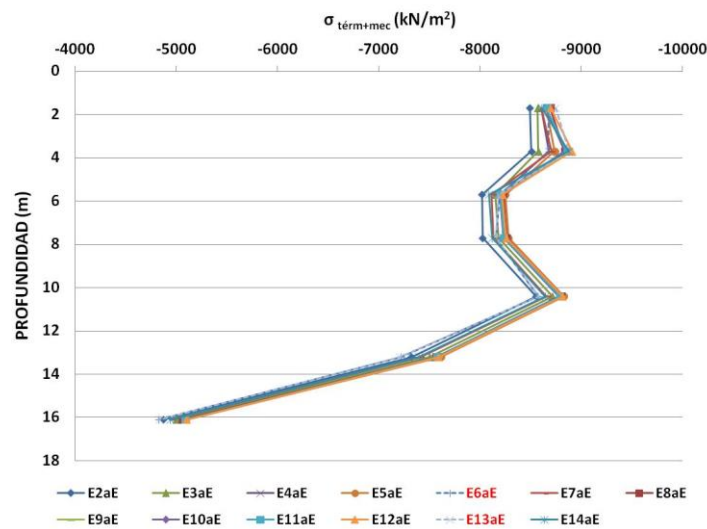


Figura VI-105. Evolución de las curvas de tensión total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

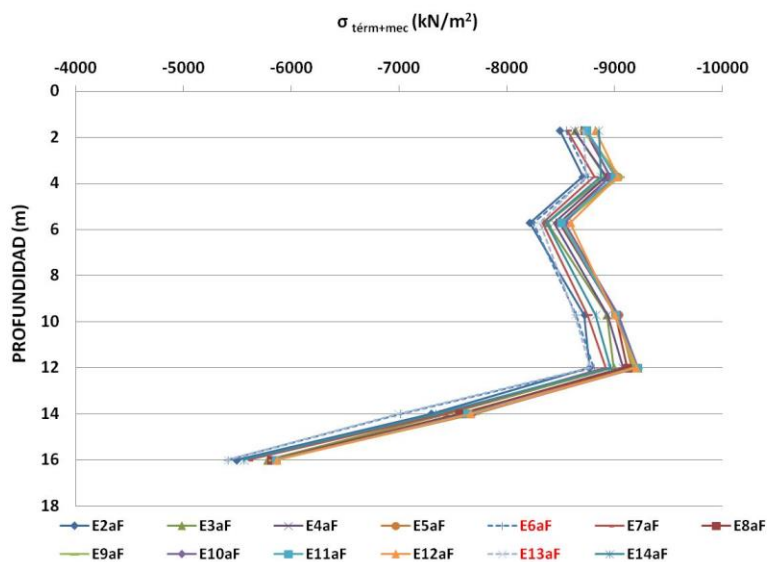


Figura VI-106. Evolución de las curvas de tensión total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

VI.5.2.5 Cargas en el interior del pilote

Incremento de carga axial de origen térmico

En las siguientes Figura VI-107 y Figura VI-108 se puede observar la evolución de las curvas de incremento de carga axial de origen térmico a lo largo del ensayo E, obtenidas a partir de los datos de extensómetros y fibra óptica, en el punto “a” de cada ciclo. El mayor incremento de esfuerzo axial se observa a la profundidad de 14 metros, alcanzando 100 kN en los extensómetros, y 140 kN en los sensores de fibra óptica.

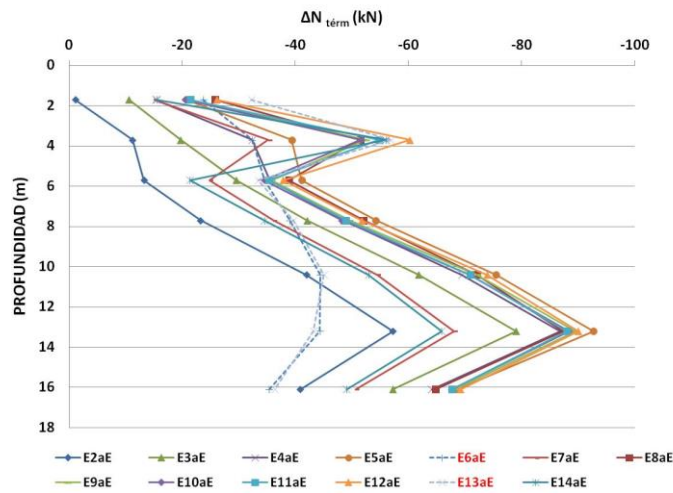


Figura VI-107: Evolución de las curvas de incremento de carga térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

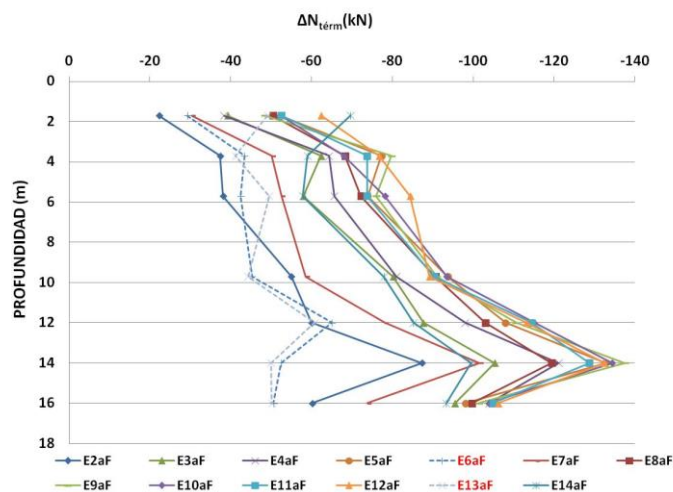


Figura VI-108: Evolución de las curvas de incremento de carga térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

Carga axil total

Añadiendo a la distribución de esfuerzo axil existente en el momento E0 (debido a la carga mecánica de 1000 kN en cabeza del pilote) los incrementos de esfuerzo axil de origen térmico determinados a lo largo del ensayo E, puede representarse la distribución en la profundidad del esfuerzo axil total en los diferentes ciclos y puntos del ciclo del ensayo. Las siguientes figuras (Figura VI-109 y Figura VI-89) representan la evolución de las curvas de distribución de carga axil total con la profundidad a lo largo del ensayo E, obtenidas a partir de los extensómetros y los sensores de fibra óptica, en el punto “a” de cada ciclo, correspondiente al momento de máxima inyección de potencia.

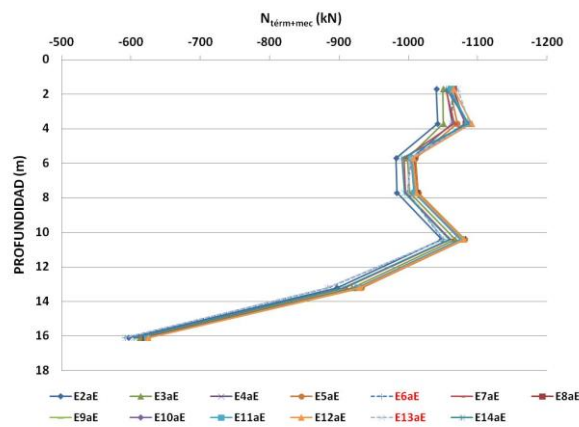


Figura VI-109: Evolución de las curvas de carga total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)

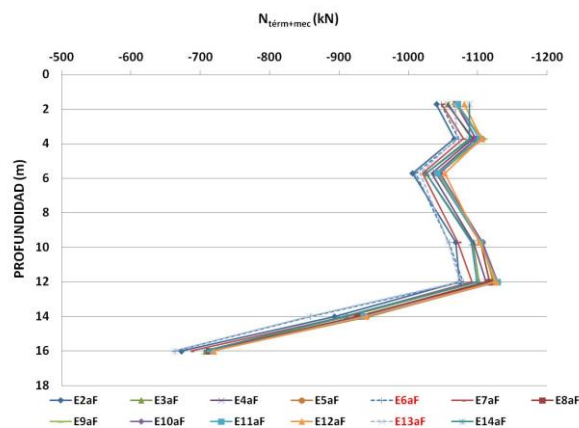


Figura VI-110: Evolución de las curvas de carga total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)

CAPITULO VII
ANÁLISIS DE RESULTADOS

VII.1 INTRODUCCION

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos durante los diferentes ensayos realizados con el fin de caracterizar el comportamiento geotécnico y termo-mecánico del pilote. Por orden cronológico estos ensayos han sido:

- Dos ensayos de carga estática en el pilote ya hincado, antes de la introducción de calor en el mismo (ensayos A y B).
- Un ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno (ensayo C).
- Un ensayo de simulación de cargas diarias en un edificio de oficinas durante 15 días consecutivos (ensayo E).

Los dos ensayos de carga estática permiten analizar fundamentalmente la capacidad portante del pilote, la distribución de la tensión con la profundidad, la evolución con el tiempo de los movimientos en cabeza del pilote, los perfiles de deformación, tensión, cargas internas y las cargas transmitidas al terreno a través del fuste y de la punta, es decir, la relación tenso-deformacional del pilote con el terreno que lo rodea.

El ensayo C es un ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno diseñado específicamente para este proyecto. Se trata de registrar la respuesta del sistema a la inyección de calor mediante una secuencia controlada de diferentes potencias térmicas. La respuesta del conjunto se ha medido en términos de evolución con el tiempo de los perfiles de temperatura, movimientos en cabeza del pilote, deformaciones, tensiones, cargas internas y cargas transmitidas al terreno, estando el pilote sometido a una carga mecánica de 1000 kN. Con el fin de evitar posibles malentendidos, se ha decidido no llamarlo “Test de respuesta térmica” ya que, en rigor, no se trata de un ensayo TRT y no se sigue el protocolo de ensayo indicado para este tipo de ensayos en sondeos.

Por último, se analiza el ensayo E, que simula, mediante la inyección de una secuencia de cargas térmicas diarias, el funcionamiento de la instalación geotérmica para climatizar un edificio de oficinas durante 15 días consecutivos en modo refrigeración. Se analizan en detalle todos los puntos de un ciclo tipo, el ciclo 2, de los 15 realizados en este ensayo, y seguidamente se analizan los 15 ciclos completos. En ambos bloques se sigue el mismo orden de análisis de resultados de los casos anteriores: evolución de las temperaturas en el interior del pilote, movimientos en

cabeza, incremento de las deformaciones, tensiones, cargas internas y cargas transmitidas al terreno.

VII.2 PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA: ENSAYOS A Y B

La prueba de carga estática presenta dos objetivos fundamentalmente: analizar la capacidad portante del pilote y la distribución de tensiones con la profundidad. Se estudian a continuación los resultados obtenidos en cada una de las dos pruebas realizadas, denominadas ensayos A y B, respectivamente.

VII.2.1 Primera prueba de carga estática. Ensayo A

En el ensayo A se realizaron 5 ciclos de carga hasta 1000 kN, y posteriormente se descargó el pilote hasta 0 kN. Tal como se comentó en el capítulo de resultados, en este ensayo se dispone únicamente del registro de datos tomados con los extensómetros de cuerda vibrante.

VII.2.1.1 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Conforme se ha descrito anteriormente, se realizaron cinco ciclos de carga en el pilote, desde 250 kN hasta 1000 kN durante 24 horas. Como era de esperar, los movimientos verticales, registrados en la cabeza del pilote por LVDT's y flexímetros, resultaron máximos bajo la carga de 1000 kN, y reflejan nítidamente la evolución con el tiempo de los ciclos de carga aplicados (Figura VII-1 y Figura VII-2). Los resultados obtenidos mediante los flexímetros y los LVDT, correspondientes a las mismas ubicaciones, son muy parecidos, lo que garantiza la fiabilidad de las mediciones afectadas.

Por lo que respecta a los movimientos horizontales, son de menor entidad que los verticales y muestran una evolución con el tiempo que refleja también las cargas aplicadas en los cinco ciclos del ensayo. El origen de estos movimientos podría buscarse en una ligera falta de verticalidad del sistema de aplicación de las cargas.

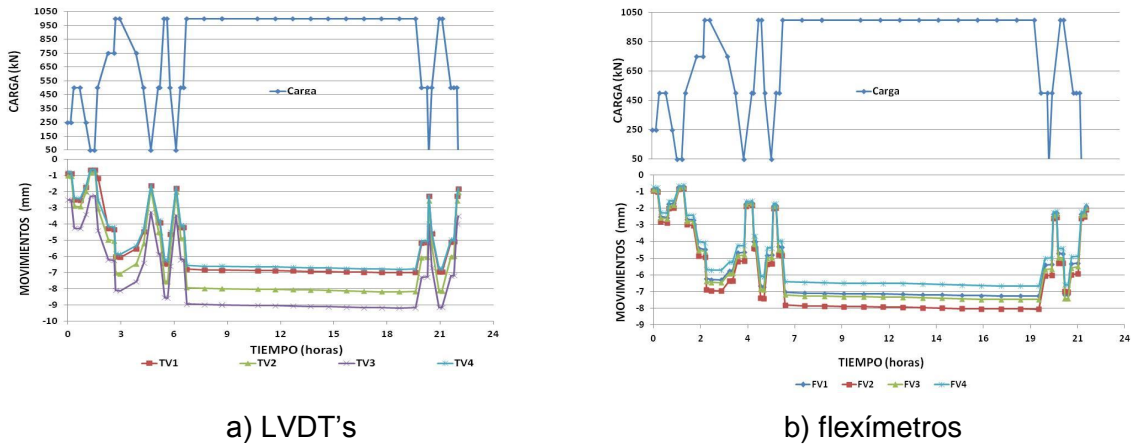


Figura VII-1. Movimientos verticales registrados por LVDT's y flexímetros durante el ensayo A

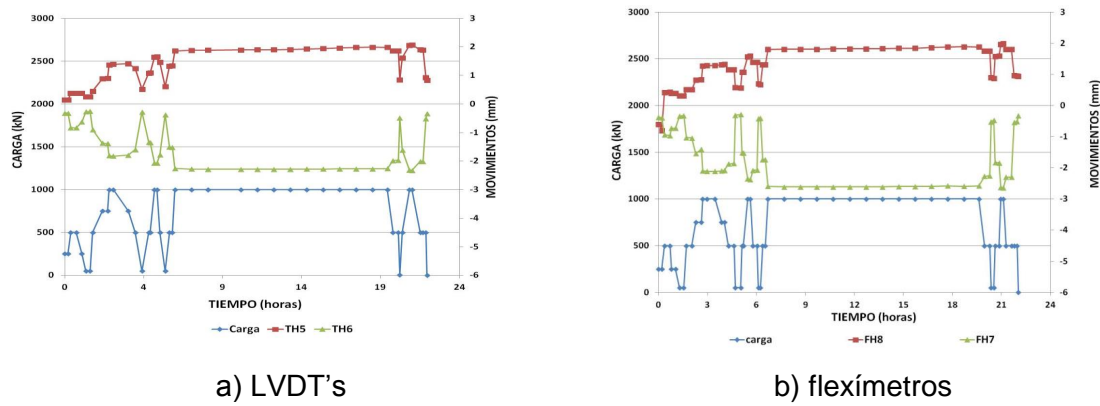


Figura VII-2. Movimientos horizontales registrados por LVDT's y flexímetros durante el ensayo A

VII.2.1.2 Deformaciones medidas en el interior del pilote

En la Figura VII-3 se representan las deformaciones verticales medidas en el interior del pilote a lo largo del ensayo junto con la columna litológica del emplazamiento, determinada en el sondeo realizado a una distancia de dos metros del pilote.

En primer lugar, analizando la **influencia del perfil litológico** en el comportamiento deformacional del pilote, puede observarse que los primeros 8 metros de terreno, de naturaleza arcillosa, registran una deformación proporcional a la carga mecánica aplicada que se mantiene constante con la profundidad. A partir de 10-11 metros, donde comienzan a predominar las gravas en el terreno circundante, la deformación en el interior del pilote comienza a disminuir, siendo mínima en la punta. Las propiedades geotécnicas del terreno permiten dar una explicación coherente a estas curvas y justificar el comportamiento del pilote. Los primeros metros de profundidad son eminentemente arcillosos, muy poco resistentes, lo que permite al pilote

deformarse más libremente bajo la acción de las cargas mecánicas aplicadas. Incluso el nivel arenoso existente entre 8 y 10 m ofrece poca resistencia al desarrollo de deformación en el pilote. De esta forma, se puede anticipar que, en la primera mitad del pilote, se produce muy poca transferencia de carga del pilote al terreno. A partir de 10-11 m de profundidad, la predominancia de gravas, de mayor resistencia, constriñen la deformación del pilote. Éste, a su vez, transmite una mayor carga al terreno.

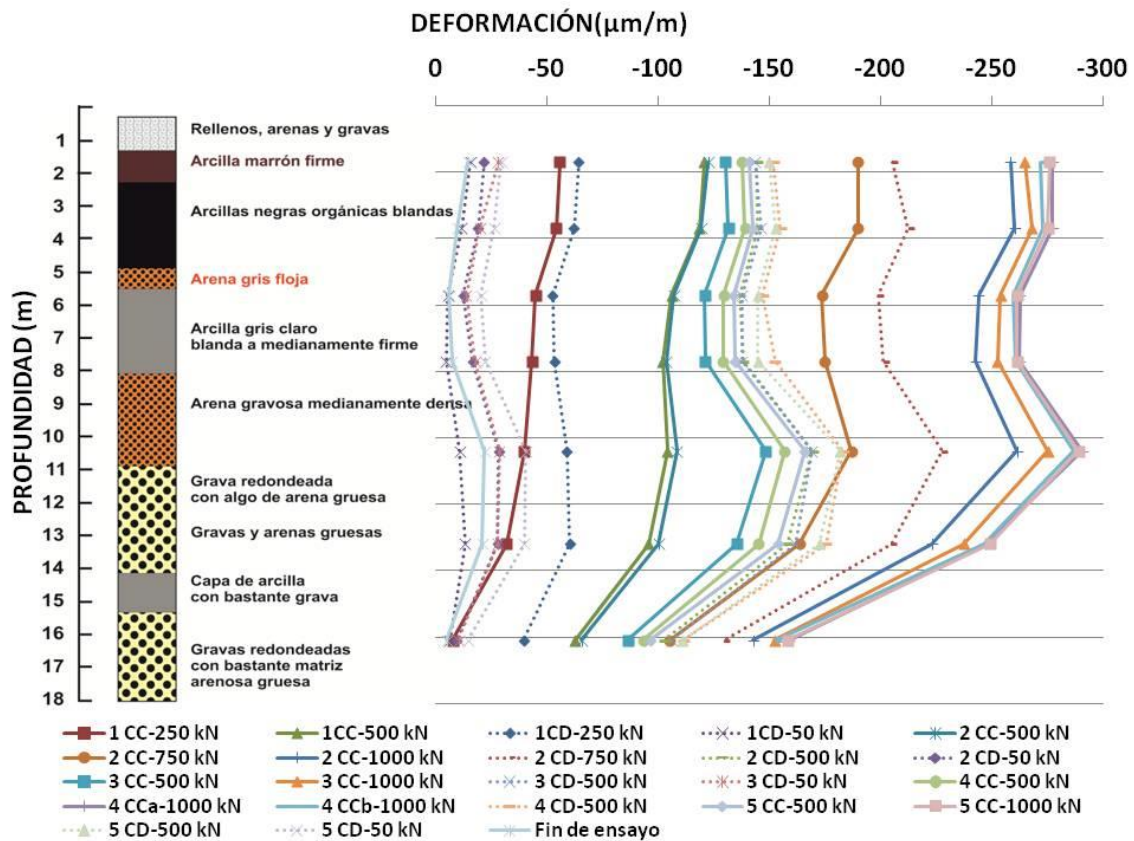


Figura VII-3: Variación de la deformación con la profundidad en el ensayo A (extensómetros)

De acuerdo con la columna es interesante destacar que, en este ensayo, que consta de 4 ciclos con carga máxima de 1000 kN, la curva de deformación correspondiente a este nivel de carga es prácticamente la misma en todos los ciclos (curvas 2CC-1000, 3CC-1000, 4CCa-1000, 4CCb-1000 y 5CC-1000). Se observa también que las curvas correspondientes a los escalones de 500 kN se sitúan todas dentro de una banda relativamente estrecha, localizándose las curvas de descarga ligeramente a la derecha (mayor deformación) de las curvas de recarga dentro de los ciclos 2, 3, 4 y 5 (ver Figura VI-12 a Figura VI-16). En el segundo ciclo la diferencia entre la deformación observada en el escalón de carga y en el escalón de descarga de 500 kN es algo

mayor (ver Figura VI-13). Esta diferencia de deformación, para un mismo nivel de carga, en los ciclos siguientes se atenúa bastante. El mismo fenómeno se observa en las curvas correspondientes a los 250 kN. Para 250 kN la diferencia entre la deformación en los escalones de carga y descarga es mayor en el ciclo 1. De hecho, los ciclos 1 y 2 son los primeros en los que se sobrepasan los escalones de 250 kN y 500 kN, respectivamente. Esto es, en los primeros ciclos, las deformaciones que se alcanzan en las “ramas noales” de carga son claramente inferiores a las de las ramas de descarga. En los ciclos sucesivos esta diferencia tiende a desaparecer.

En el ciclo 4, que mantiene la carga máxima de 1000 kN durante 10 horas, se obtuvo el mismo perfil de deformación al principio (curva 4CCa-1000 kN) y al final de este escalón (curva 4CCb-1000 kN). Este comportamiento refleja que, al menos en ese periodo de tiempo, no hay evolución de la deformación con el tiempo a carga constante.

Por último, la curva correspondiente al final del ensayo se aproxima bastante al valor de deformación cero en todas las profundidades, sobre todo en los 10 metros superiores, mostrando el pilote una recuperación de las deformaciones al eliminar las cargas mecánicas aplicadas.

En resumen, el análisis de las deformaciones medidas en el interior del pilote permite observar lo siguiente:

- Deformaciones mayores y sin decrecer con la profundidad en los 10-11 metros superiores del pilote, anticipando poca transferencia de carga al terreno, como consecuencia de niveles litológicos poco resistentes.
- Deformaciones decrecientes con la profundidad en la zona inferior del pilote, reflejando una mayor transferencia de carga al terreno, constituido por materiales más resistentes en esos niveles litológicos.
- Curvas de deformación semejantes para un mismo nivel de carga en los diferentes ciclos de carga del ensayo.
- Para un mismo valor de la carga aplicada, las deformaciones son mayores en las ramas de descarga que en las de carga de cada ciclo. Esta diferencia es mayor en los primeros ciclos y se atenúa en los siguientes.
- El mantenimiento durante 10 horas de la carga máxima (en el ciclo 4) no afecta a la deformación.
- Recuperación con la descarga, de prácticamente toda la deformación, sobre todo en los 10 m superiores.

Paralelamente, integrando las deformaciones verticales a lo largo del pilote, se ha determinado el acortamiento del pilote a lo largo del tiempo de ensayo. En la Figura VII-4 se muestra la evolución con el tiempo del movimiento vertical en cabeza del pilote (U_z) a partir de las medidas de los 4 LVDT's, junto con el acortamiento vertical (Δl) obtenido a partir de los valores registrados por los sensores en el interior del pilote.

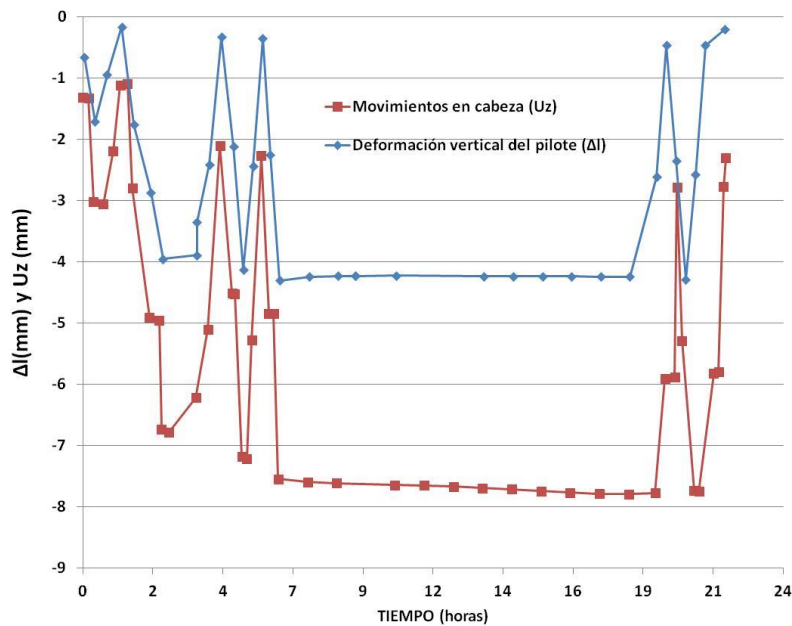


Figura VII-4: Movimientos en cabeza y deformación vertical del pilote durante el ensayo A

Como se observa en la Figura VII-4, tanto los movimientos en la cabeza como la deformación vertical del pilote presentan una respuesta temporal inmediata a los escalones de carga del ensayo, siendo las curvas de evolución con el tiempo un reflejo perfecto de las cargas aplicadas. En ambos casos, los valores máximos registrados se obtienen durante la aplicación de los escalones de carga de 1000 kN:

- Máximo valor de movimientos en cabeza: 7,8 mm
- Máximo valor de acortamiento del pilote: 4,2 mm

VII.2.1.3 Tensiones medidas en el interior del pilote

Las curvas de distribución de tensión vertical con la profundidad (Figura VII-5) son semejantes a las de deformación vertical, cambiando la escala. Ello es debido a que se obtienen a partir de las anteriores, multiplicando por una constante, el módulo de elasticidad del pilote. De igual forma que en el apartado anterior, el nivel de tensiones se mantiene aproximadamente constante en los metros superiores de suelos blandos arcillosos, y disminuye con la profundidad en los metros inferiores de gravas. La tensión máxima se registra a 10 metros de profundidad, siendo de 9000 kN/m², bajo la acción de una carga de 1000 kN en cabeza.

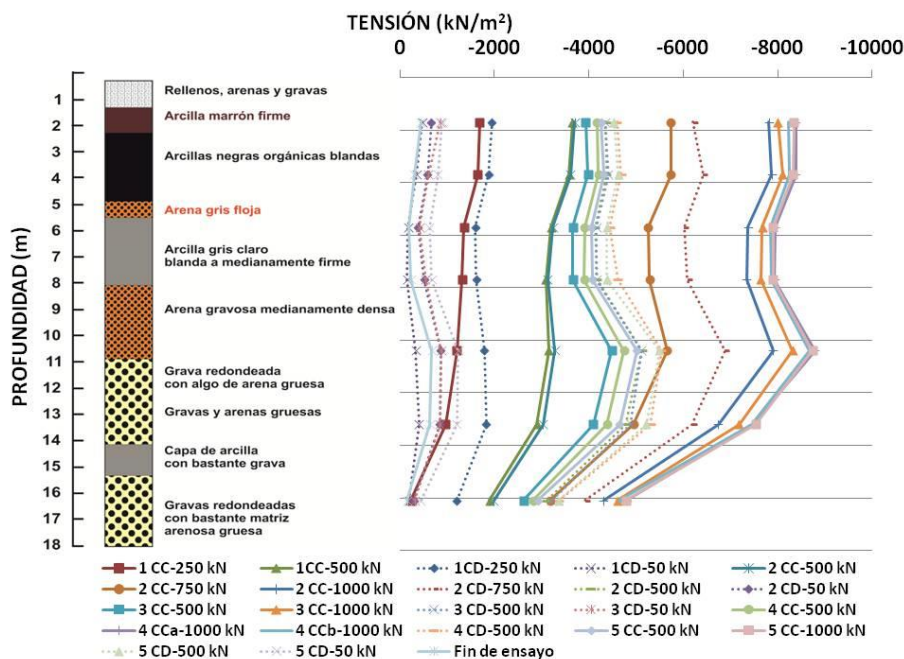


Figura VII-5: Variación de la tensión con la profundidad en el ensayo A (extensómetros)

VII.2.1.4 Cargas axiales en el pilote

La transformación de tensiones a cargas axiales se realiza multiplicando las tensiones por la superficie de la sección del pilote. De esta forma, una vez más, se generan las mismas curvas con una escala diferente. Como en los casos anteriores, se observa que en los primeros 10 metros, de terreno blando arcilloso, la carga axial no varía prácticamente nada, lo que quiere decir que el pilote no está transmitiendo carga al terreno. A partir de los 10 metros, ya en terreno más competente, el esfuerzo axial en el

pilote va disminuyendo con la profundidad, esto es, se transmite carga por fuste al terreno.

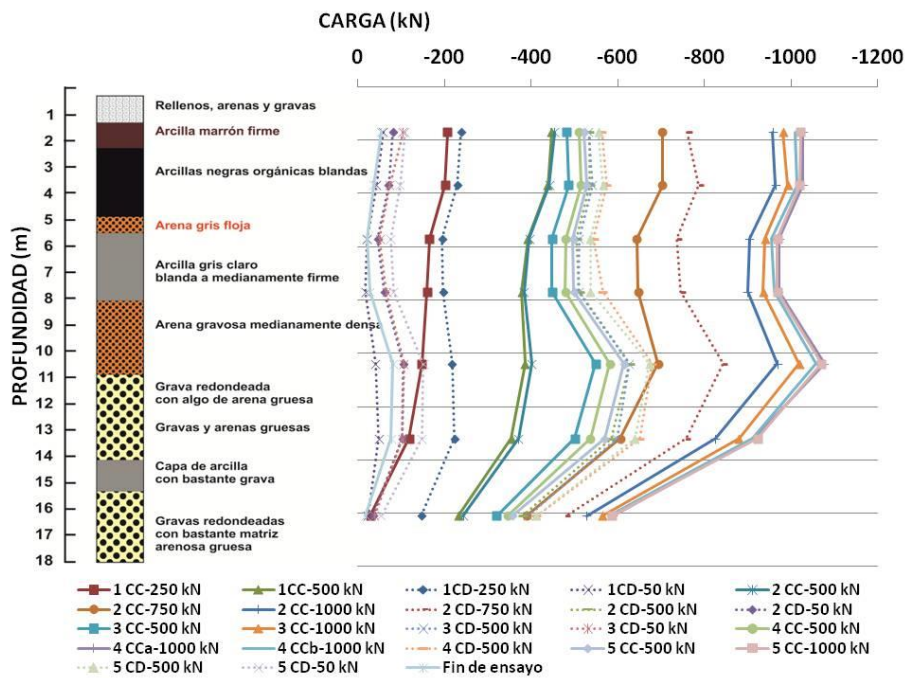


Figura VII-6: Variación de la carga con la profundidad en el ensayo A (extensómetros)

VII.2.1.5 Carga en la punta del pilote

La carga transmitida por punta al terreno se puede estimar a partir de la carga axil correspondiente a la profundidad de 16,2 m, obtenida a partir del registro del par de extensómetros instalados a esta profundidad. En la Figura VII-7 se representa la evolución de la carga por punta, así determinada, a lo largo del ensayo A. Se observa que la máxima carga vertical que le llega a la punta, es de 600 kN, cuando el pilote se encuentra sometido a la máxima carga de 1000 kN.

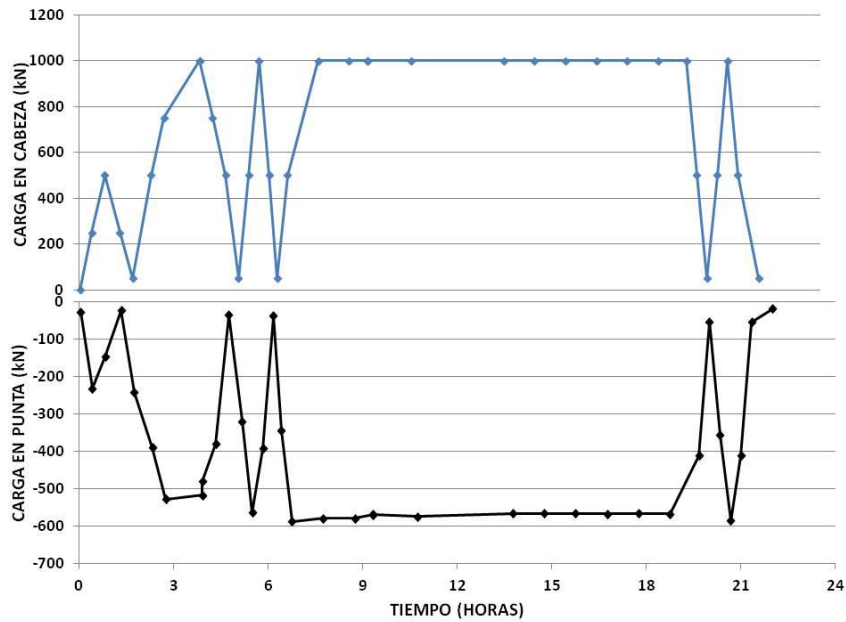


Figura VII-7. Evolución de la carga en la punta del pilote en el ensayo A

VII.2.1.6 Comportamiento en la punta del pilote

Con el fin de ahondar en el comportamiento del pilote durante esta primera prueba de carga estática, se recogen en la Tabla VII-1 los valores de la carga en cabeza, asiento en cabeza, carga en punta, acortamiento del pilote y asiento en punta, correspondientes a los diferentes escalones de los cinco ciclos del ensayo A. Se destacan en **negrita** los valores máximos de cada una de estas magnitudes observadas, en cada ciclo.

Se observa que tras la aplicación de los diferentes escalones de carga, el pilote responde, en general, de forma inmediata en términos de carga en punta y acortamiento. Sin embargo, en algún ciclo, los movimientos de la cabeza del pilote pueden desarrollarse tras un cierto desfase temporal. En el asentamiento en la punta, calculado como la diferencia entre el movimiento de la cabeza y el acortamiento del pilote, se refleja también este desfase acorde con los movimientos relativos de los dos parámetros de los que depende. Así se justifica, por ejemplo, que en el ciclo 5, el máximo asentamiento en punta (-7,3 mm) se produzca durante el escalón de 50 kN en la rama de descarga. Ello es debido al elevado movimiento de la cabeza del pilote (-7,8 mm), desfasado, mientras que el acortamiento del pilote ya se ha recuperado y muestra un valor muy reducido (-0,2 mm).

Tabla VII-1: Datos obtenidos durante el ensayo A

Fecha	Ciclo	Carga en cabeza (kN)	Carga en punta (kN)	Movimientos en cabeza (mm)	Acortamiento (mm)	Asiento en punta (mm)
15-1-13 20:43	1	250	-28,9	-1,3	-0,7	-0,6
15-1-13 21:05		500	-232,2	-3,0	-1,7	-1,3
15-1-13 21:30		250	-147,1	-3,1	-0,9	-2,2
15-1-13 22:00		50	-23,9	-1,1	-0,2	-0,9
15-1-13 22:25	2	500	-243,3	-2,8	-1,8	-1,0
15-1-13 23:00		750	-389,8	-4,9	-2,9	-2,0
15-1-13 23:25		1000	-528,4	-6,7	-4,0	-2,7
16-1-13 0:35		1000	-517,6	-6,2	-3,9	-2,3
16-1-13 0:35		750	-480,1	-6,2	-3,3	-2,9
16-1-13 1:00		500	-380,5	-5,1	-2,4	-2,7
16-1-13 1:25		50	-35,9	-2,1	-0,3	-1,8
16-1-13 1:50	3	500	-320,2	-4,5	-2,1	-2,4
16-1-13 2:10		1000	-564,2	-7,2	-4,1	-3,1
16-1-13 2:30		500	-393,1	-5,3	-2,4	-2,9
16-1-13 2:50		50	-38,5	-2,3	-0,4	-1,9
16-1-13 3:05	4	500	-345,2	-4,8	-2,3	-2,5
16-1-13 3:25		1000	-588,3	-7,5	-4,3	-3,2
16-1-13 4:25		1000	-579,4	-7,6	-4,2	-3,4
16-1-13 5:25		1000	-579,4	-7,6	-4,2	-3,4
16-1-13 7:25		1000	-569,4	-7,6	-4,2	-3,4
16-1-13 10:25		1000	-566,7	-7,7	-4,2	-3,5
16-1-13 11:25		1000	-566,5	-7,7	-4,2	-3,5
16-1-13 12:25		1000	-565,9	-7,7	-4,2	-3,5
16-1-13 13:25		1000	-567,0	-7,8	-4,2	-3,6
16-1-13 14:25		1000	-566,7	-7,8	-4,2	-3,6
16-1-13 15:25		1000	-567,4	-7,8	-4,2	-3,6
16-1-13 16:20		500	-412,2	-7,8	-2,6	-5,6
16-1-13 16:40		50	-53,6	-5,9	-0,5	-5,4
16-1-13 17:00		5	500	-357,0	-5,9	-2,4
16-1-13 17:20	1000		-585,5	-5,3	-4,3	-1,0
16-1-13 17:40	500		-412,0	-7,7	-2,6	-5,1
16-1-13 18:00	50		-54,2	-7,8	-0,5	-7,3
16-1-13 18:40	0		-18,5	-2,8	-0,2	-2,6

Cabe destacar una cierta acumulación de asiento en la punta con los sucesivos ciclos. En concreto, al final del ensayo (última fila), con carga en cabeza nula, el asiento acumulado en la punta del pilote resulta ser de 2,6 mm. Este resultado es explicable por una cierta densificación del suelo bajo la punta del pilote por las sucesivas aplicaciones de carga. El asiento acumulado en la punta, al final del ensayo, es bastante coincidente con el asiento acumulado en cabeza del pilote (2,8 mm), mientras el acortamiento remanente del pilote resulta ser -0,2 mm. Se analizan a continuación las posibles relaciones existentes entre los cuatro parámetros de la tabla (Figura VII-8).

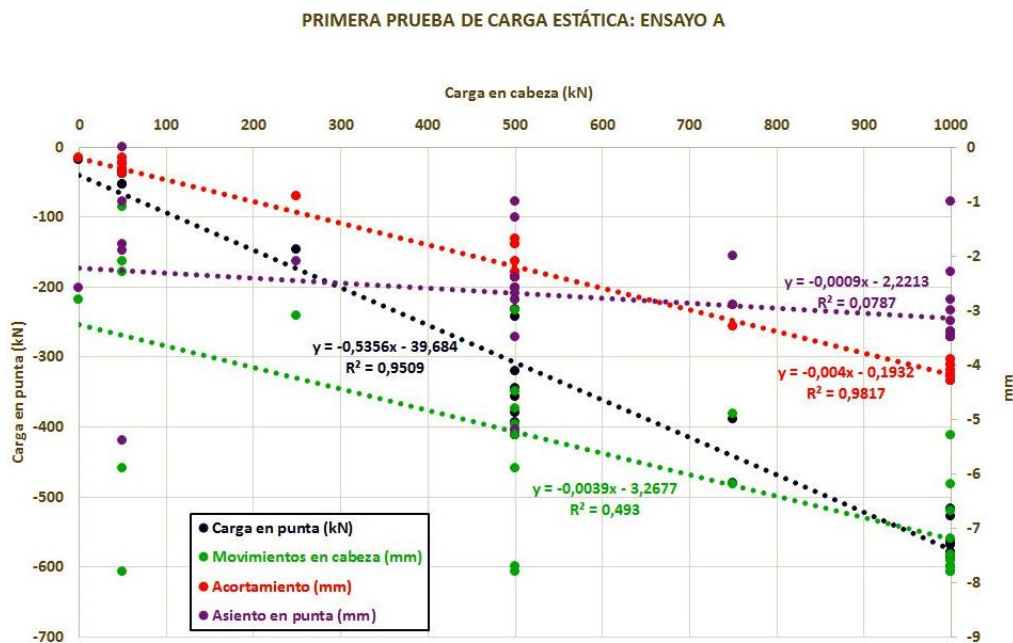


Figura VII-8. Correlación de parámetros en el ensayo A

De los cuatro parámetros estudiados, se observa que dos de ellos, carga en punta y acortamiento del pilote, muestran una clara dependencia de la carga aplicada en cabeza. Por el contrario, los valores de asiento en punta y los movimientos en cabeza no parecen presentar una fuerte proporcionalidad. Una vez establecidas las líneas de tendencia de las cuatro posibles correlaciones, sus ecuaciones de correlación y su ajuste se recoge en la Figura VII-8.

Se observa en la Figura VII-8 que existe una buena correlación entre la carga en cabeza y el acortamiento del pilote ($R^2 = 0,9817$). Esta buena correlación describe un comportamiento de tipo elástico en el pilote, que responde a la aplicación de carga

mecánica con un acortamiento proporcional que recupera cuando desaparece la carga aplicada. Asimismo, se observa una buena correlación entre la carga aplicada en cabeza y la carga registrada en punta ($R^2 = 0,9509$).

La correlación entre cargas y asientos no es buena si se considera la totalidad del ensayo. Esta situación cambia si se consideran únicamente los tres primeros ciclos, esto es, si se descarta el ensayo a partir del 4º ciclo, en el cual se mantuvo una carga constante de 1000 kN durante un tiempo prolongado (12 horas). En la Figura VII-9 se comparan las correlaciones entre carga en punta y asiento en punta considerando todos los ciclos, los dos primeros ciclos y únicamente el tercer ciclo. Se puede observar que con los dos primeros ciclos la correlación es mejor que con todos los ciclos; pero donde se observa realmente una buena correlación es en el tercer ciclo. Esto se debe a que en los dos primeros ciclos se producen asientos no recuperables, al ser la primera vez que se carga el pilote a 500 kN y a 1000 kN, respectivamente. Ya en el ciclo tercero el pilote se vuelve a cargar a 1000 kN y la respuesta es más de tipo elástico. Finalmente, dentro del cuarto ciclo, el mantenimiento en el tiempo de la carga de 1000 kN puede haber inducido una cierta influencia de factores de tipo reológico que hacen empeorar el ajuste de la correlación, o bien, más probablemente, puede deberse a efectos parásitos sobre los dispositivos de medida de los asientos en cabeza.

PRIMERA PRUEBA DE CARGA ESTÁTICA. ENSAYO A

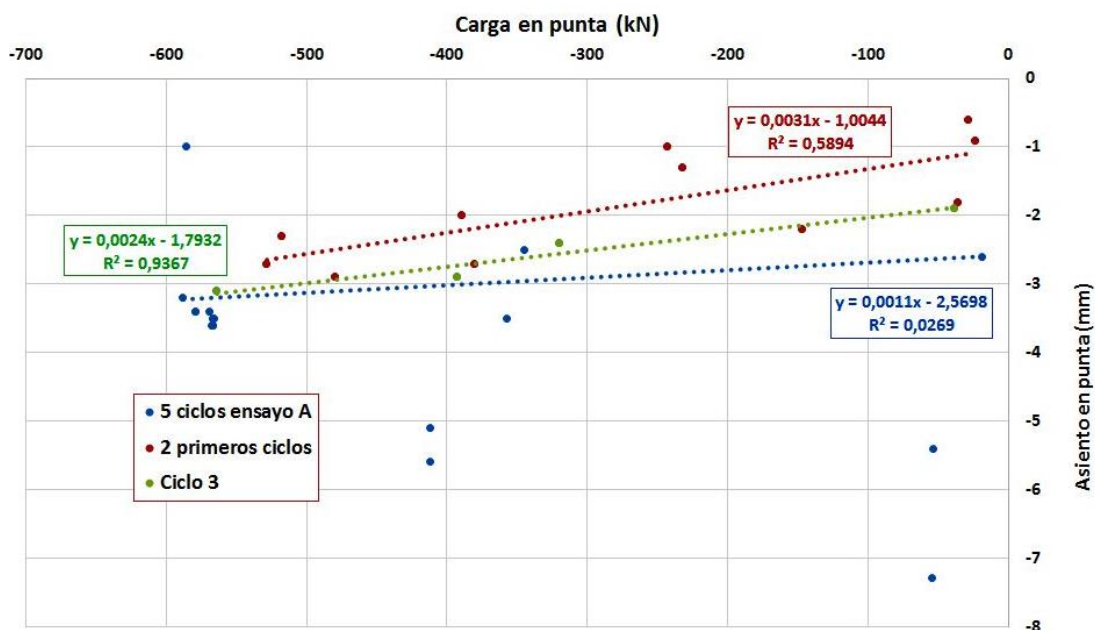


Figura VII-9. Relación entre la carga en punta y el asiento en punta. Ensayo A

Analizando específicamente la relación entre la carga en cabeza con el movimiento vertical en cabeza (Figura VII-10) y la carga en punta con el asentamiento en punta (Figura VII-11) durante los tres primeros ciclos del ensayo se observa que durante los ciclos 1 y 2, la rama de descarga se separa de la rama de carga, provocando una cierta histéresis en la curva resultante. Este fenómeno puede atribuirse a fenómenos de ajuste de los asientos a las cargas aplicadas por primera vez durante los ciclos 1 y 2. Por el contrario, en el ciclo 3, ambas ramas coinciden mejor, mostrando un comportamiento más elástico, sin asientos remanentes.

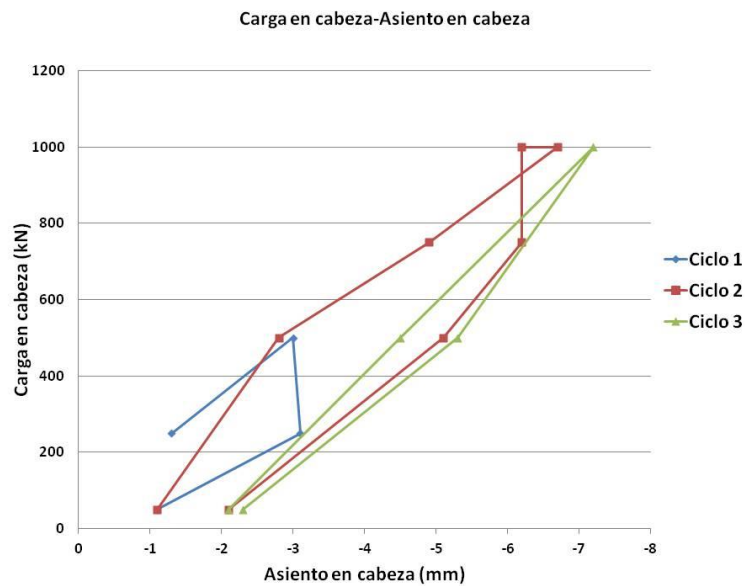


Figura VII-10. Carga en cabeza vs asiento en cabeza a lo largo del ensayo A

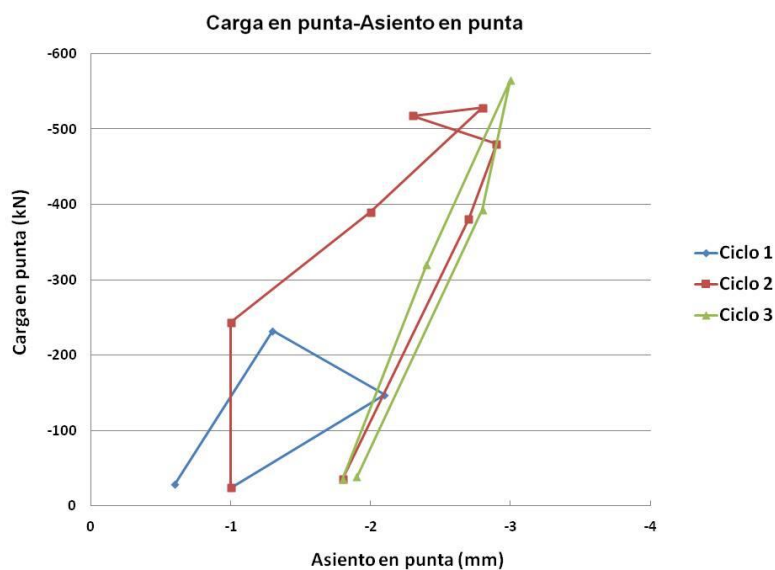


Figura VII-11. Carga en punta vs asiento en punta a lo largo del ensayo A

VII.2.1.7 Tensión transmitida al terreno por fuste

Como ya se ha comentado anteriormente, una parte del total de la carga aplicada al pilote, se distribuye a través del fuste y se transmite al terreno que lo rodea. El resto, se transmite a través de la punta. Es posible determinar el valor de esta carga transmitida a través del fuste a partir de las cargas a distintas profundidades calculadas en el apartado anterior, conociendo la dimensión lateral del pilote, según la siguiente expresión:

Ecuación VII-1

$$T(z_2 - z_1) = \frac{N z_2 - N z_1}{4 \cdot L \cdot (z_2 - z_1)}$$

Donde:

$T(z_2 - z_1)$ es la tensión tangencial media transmitida al terreno (kN/m²) entre las profundidades z_1 y z_2 .

z_1 y z_2 son dos profundidades diferentes a lo largo del pilote (m)

Nz_1 y Nz_2 son las cargas axiales correspondientes a las profundidades z_1 y z_2 respectivamente (kN)

L es la dimensión lateral del pilote (L = 0,35 m)

De esta forma se ha calculado la tensión transmitida por fuste en algunos escalones de carga del ensayo A (Tabla VII-2), esto es, la primera vez que se alcanzan los 500 kN en el primer ciclo (1CC-500 kN), la primera vez que se alcanzan los 750 kN (2CC-750 kN) y los 1000 kN en el segundo ciclo (2CC-1000 kN) y el escalón final de carga (5CC-1000 kN), así como el fin del ensayo A.

Tabla VII-2. Valores de tensión media transmitida por fuste en algunos momentos del ensayo A.

Tramos (m)	Tensión transmitida por fuste al terreno (kN/m ²)				
	1CC-500 kN	2CC-750 kN	2CC-1000kN	5CC-1000kN	FIN ENSAYO A
1,7 – 3,6	3,20	0,21	-2,57	0,83	6,47
3,6 – 5,6	16,58	21,21	21,54	18,24	4,89
5,6 – 7,6	5,02	-1,52	1,52	0,07	-1,65
7,6 – 10,4	-1,98	-11,47	-17,56	-25,96	-17,60
10,4 – 13,1	8,37	22,90	37,69	39,10	0,91
13,1 – 16,1	29,12	51,45	70,74	80,08	14,10

A partir de estos valores se representa en la Figura VII-12 la variación de la tensión tangencial media transmitida al terreno por fuste en función de la profundidad, correspondiente a los cinco puntos de los ciclos de carga del ensayo A referidos, determinada a partir de la variación de carga axial entre los niveles consecutivos de localización de los extensómetros. Con el fin de comprender mejor las curvas resultantes, se ha incorporado la columna litológica del terreno.

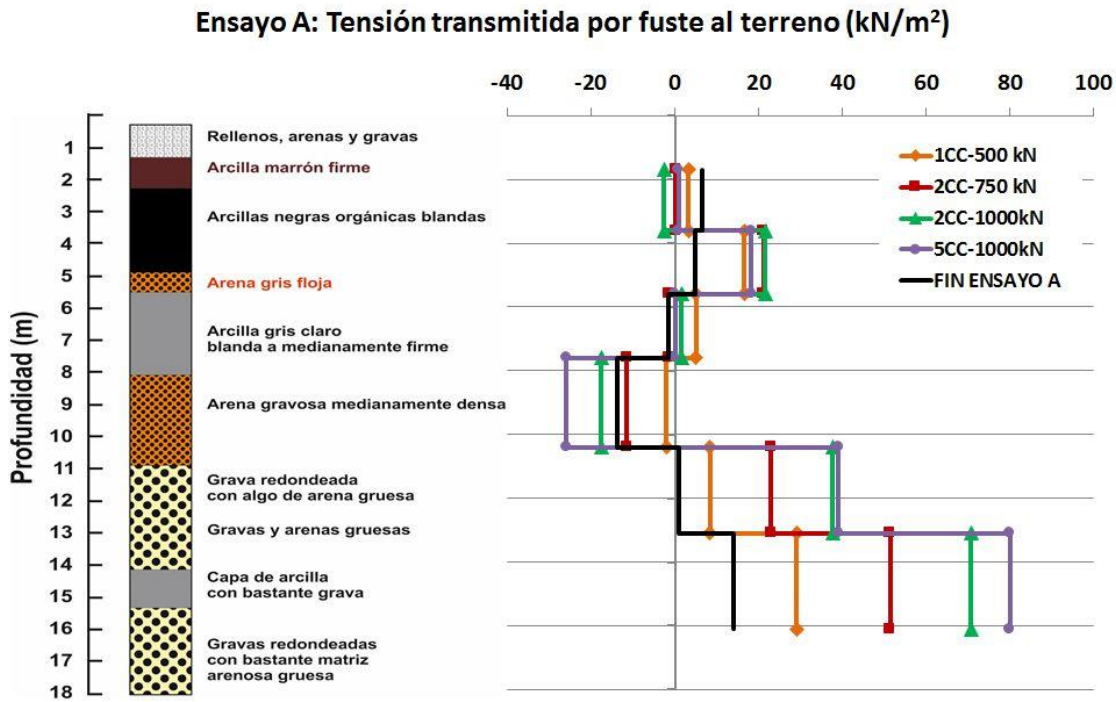


Figura VII-12. Tensión transmitida al terreno por fuste (kN/m²) en el ensayo A (extensómetros).

En primer lugar, cabe destacar el diferente comportamiento resistente de la primera y la segunda mitad del pilote. Los primeros 10 m de profundidad, coincidiendo con la existencia de materiales arcillosos de poca resistencia, se observan tramos en los que el pilote transfiere poca tensión (valores cercanos a 0 kN/m²). Se diferencian en el seno de estas arcillas, dos niveles arenosos de comportamiento diferente: El primero, a una profundidad de 5 m, soporta una tensión de en torno a 25 kN/m², lo que indica una mayor resistencia que el conjunto arcilloso. Por el contrario, entre 8 y 10 m de profundidad se observa que el terreno, lejos de admitir tensión del pilote, soportándolo, aparentemente se cuelga de él. Este fenómeno se reconoce por los valores de tensión negativos, correspondientes al segundo nivel arenoso, entre 8 y 10 m de profundidad.

Finalmente, los valores claramente positivos de los últimos metros del pilote indican que el terreno es competente y tiene la capacidad de soportar la carga transmitida por el fuste, superando los 84 kN/m² cuando el pilote está sometido a la máxima carga.

Integrando entre las profundidades de 1,7 y 16,1 m las tensiones de corte transmitidas al terreno por fuste durante el ciclo 5, bajo 1000 kN de carga en cabeza, la carga total que se está transmitiendo por fuste es de **433 kN** aproximadamente, valor muy próximo a la diferencia de carga axil entre la cabeza y la punta (profundidad 16,10 m) del pilote, que sería de 412 kN, aproximadamente.

VII.2.1.8 Análisis de las cargas transmitidas al terreno

Es importante comparar los niveles de carga alcanzados durante el ensayo A, con el pilote cargado a 1000 kN, con los valores de resistencia definidos por fuste y por punta durante el diseño e hinca del pilote (capítulo IV).

En primer lugar, la capacidad portante calculada mediante métodos analíticos durante el diseño del pilote, se distribuiría del siguiente modo (Tabla VII-3):

Tabla VII-3. Determinación de la resistencia por fuste, por punta y total mediante métodos analíticos

	Intervalo de profundidad (m)	Fórmula analítica	Método SPT
Resistencia por fuste (kN)	0-2	64,40(*)	-
	2-8	140,28(*)	-
	8-15	712,58	330,75
	15-17	336,00	280,00
	Resistencia por fuste total (kN)	1048,58	610,75
	Resistencia por punta (kN)		1960, 04
Capacidad portante total del pilote (kN)		3008,62	2570,79

(*)se desprecia

Posteriormente, durante el proceso de hinca del pilote, se realizó una prueba de carga dinámica cuya interpretación de datos según el método CAPWAP permite determinar

la capacidad portante del pilote real, que se distribuye de la siguiente manera (Tabla VII-4).

Tabla VII-4. Determinación de la resistencia por fuste, por punta y total mediante el método CAPWAP

Intervalo de profundidad (m)	z (m)	Resistencia unitaria por fuste (kN/m ²)	Resistencia por fuste (kN)
0-2,1	2,1	0	0
2,1-3,1	3,1	4,7	6,6
3,1-4,2	4,2	0	0
4,2-5,2	5,2	8,1	11,4
5,2-6,3	6,3	27,7	42,7
6,3-7,3	7,3	25,6	35,8
7,3-8,4	8,4	10,6	16,3
8,4-9,4	9,4	11,5	16,1
9,4-10,5	10,5	30,5	47
10,5-11,5	11,5	38,5	53,9
11,5-12,6	12,6	19,2	29,6
12,6-13,6	13,6	1,3	1,8
13,6-14,7	14,7	28	43,1
14,7-15,7	15,7	102,5	143,5
15,7-16,8	16,8	171,1	263,5
Resistencia por fuste total (kN)			711,3
Resistencia por punta (kN)			1800
Capacidad portante total del pilote (kN)			2511,3

Comparando ambos métodos de cálculo se observa que la capacidad portante obtenida es similar, en particular cuando se utiliza el SPT para determinar mediante el método analítico la resistencia por fuste. La resistencia por punta varía entre 1800 y 1960 kN. Por su parte, la resistencia por fuste calculada mediante métodos analíticos oscila entre 610,75 (método SPT) y 1048,58 kN (formulaciones analíticas) y alcanza los 711,3 kN con el ensayo de hinca. La resistencia total, suma de punta y fuste, obtenida a partir de ambos métodos, resulta, pues, muy similar.

Se pretende a continuación comparar la resistencia por punta, por fuste y la capacidad portante total del pilote obtenidos mediante el método CAPWAP durante la hinca del pilote, con las tensiones de corte transmitidas al terreno por fuste en el ciclo 5, bajo 1000 kN de carga en cabeza durante el ensayo A (Tabla VII-5).

Tabla VII-5. Comparación entre resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensión transmitida por fuste del pilote al terreno (ensayo A)

Tramo (m)	Resistencia media unitaria por fuste CAPWAP (kN/m ²)	Tensión media transmitida por fuste Ensayo A, punto 5CC-1000kN (kN/m ²)
1,7 - 3,6	2,47	0,83
3,6 - 5,6	9,59	18,24
5,6 - 7,6	24,08	0,07
7,6 - 10,4	18,03	-25,96
10,4 - 13,1	23,45	39,10
13,1 - 16,1	67,46	80,08

Integrando las tensiones de corte transmitidas al terreno por fuste, en el ciclo 5, bajo 1000 kN de carga en cabeza, la carga total que se está transmitiendo por fuste es de unos 412 kN. Por otro lado, la carga transmitida al terreno por la punta del pilote es de alrededor de 588 kN. Estos valores indican que en los momentos de máxima carga del ensayo A el pilote estaría trabajando a un 58% de su resistencia por fuste y a un 33% de su resistencia por punta, lo que equivale a unos coeficientes de seguridad medios de 1,7 por fuste y 3,1 por punta. Se resumen estos valores en la Tabla VII-6.

Tabla VII-6. Comportamiento del pilote respecto a su resistencia por punta y por fuste

	CAPWAP	ENSAYO A	%	Coeficiente de seguridad
Resistencia por fuste total (kN)	711,3	412	58	1,7
Resistencia por punta (kN)	1800	588	33	3,1
Capacidad portante total del pilote (kN)	2511,3	1000	40	2,5

VII.2.2 Segunda prueba de carga estática. Ensayo B

La segunda prueba de carga estática, denominada “Ensayo B”, consiste en tres ciclos de carga en el pilote, desde 250 kN hasta 1000 kN durante 5 horas. A partir del final de este ensayo, la carga mecánica de 1000 kN se mantiene ya constante durante el resto

de la secuencia de ensayos posteriores. A diferencia del ensayo A anterior, en este ensayo se dispone de registro de datos de extensómetros y de fibra óptica.

VII.2.2.1 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Los movimientos en la cabeza medidos durante el ensayo B presentan una respuesta temporal inmediata a las cargas verticales aplicadas, siendo las curvas de evolución de los asientos con el tiempo un reflejo perfecto de las cargas aplicadas (Figura VII-13).

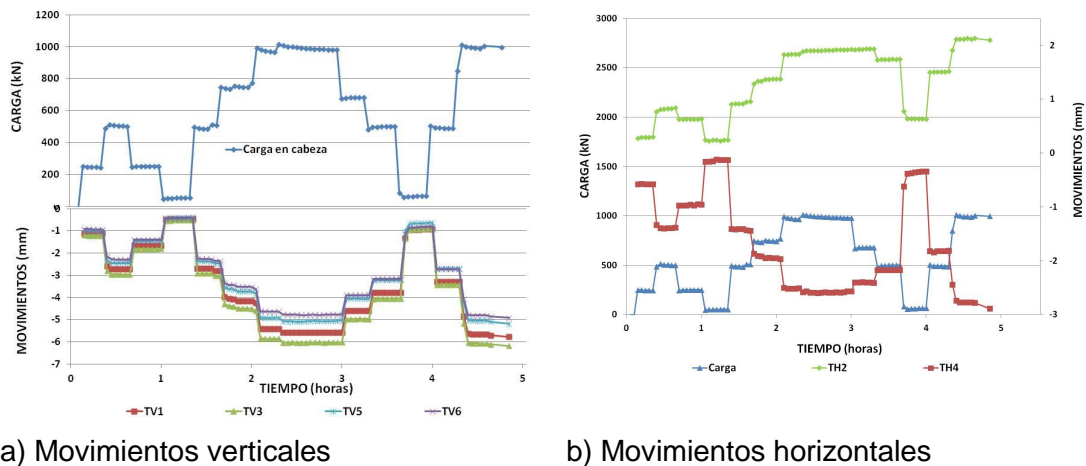


Figura VII-13. Movimientos verticales y horizontales durante el ensayo B

En el momento de aplicación de la máxima carga (1000 kN) se obtiene un asentamiento promedio en cabeza de entre 5,3 mm, inferior al obtenido en el ensayo A de 7,8 mm. Esta diferencia de asientos, de 2,5 mm, entre el ensayo A y el B concuerda muy bien con el asiento remanente observado al final del ensayo A, tras la descarga, el cual fue de 2,8 mm. Por otro lado, los movimientos horizontales indican un pequeño movimiento de la cabeza del pilote, que se desplaza, mínimamente, hacia el sureste.

VII.2.2.2 Deformaciones medidas en el interior del pilote

En el ensayo B, conforme referido, se dispone de registro de las deformaciones a través de los sensores de fibra óptica y de los extensómetros. A continuación, se representan las deformaciones verticales medidas en el interior del pilote a lo largo del ensayo, obtenidas a partir de los registros de los extensómetros (Figura VII-14) y la

fibra óptica (Figura VII-15). Se ha incorporado la columna litológica del terreno para facilitar la interpretación de los datos.

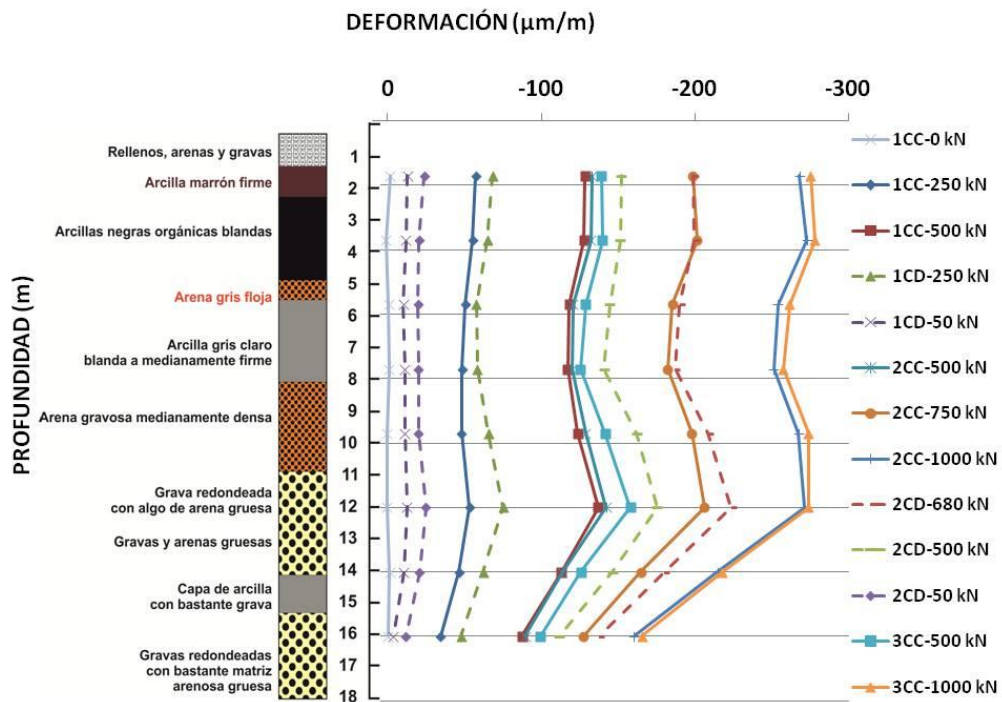


Figura VII-14 : Variación de la deformación con la profundidad en el ensayo B (extensómetros)

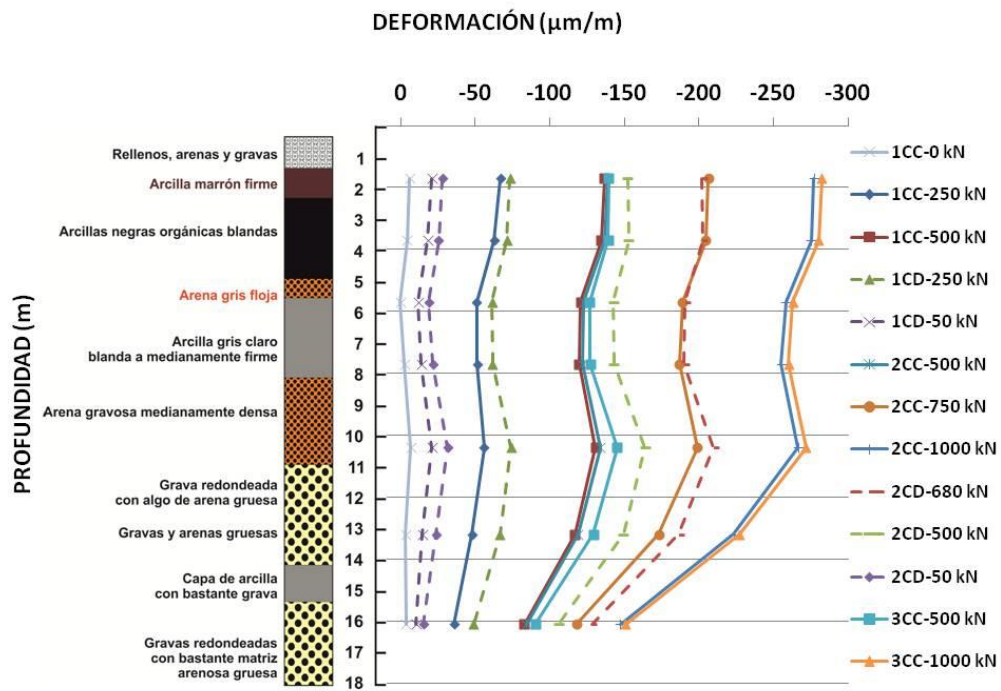


Figura VII-15 : Variación de la deformación con la profundidad en el ensayo B (fibra óptica)

Al igual que en ensayo A, en ambos casos se distinguen dos tramos en el terreno claramente diferenciados por el comportamiento deformacional del pilote. Los 10-12 metros más superficiales, compuestos por arenas y arcillas poco resistentes, muestran una deformación relativamente constante con la profundidad, muy similar en los dos tipos de sensores. El segundo tramo de terreno, compuesto por gravas redondeadas con arena, de mayor resistencia, muestra una clara disminución de la deformación con la profundidad. En cualquier caso, la deformación en la punta es la menor.

El límite entre estas dos zonas de resistencia tan diferente, parece encontrarse en torno a los 12 m en la Figura VII-15 y en torno a los 10 m en la Figura VII-14. Esta diferencia es debida a la posición de los sensores. Existe un sensor de fibra óptica a los 12 m, mientras que entre los 10 y 13 metros no existe ningún extensómetro.

De igual forma que en la primera prueba de carga (ensayo A), se observa que la deformación del pilote es proporcional a la carga aplicada y que al retirar dicha carga, el pilote tiene una cierta capacidad de recuperación. La curva correspondiente al final del primero y segundo ciclo, con 50 kN de carga aplicada en la cabeza del pilote, se aproxima bastante al valor cero o deformación nula, en todas las profundidades y mediante ambos tipos de sensores.

Por otro lado, las curvas de deformación correspondientes a las sucesivas veces que se alcanza una misma carga, se encuentran muy cercanas, siempre cumpliendo dos tendencias. En primer lugar, en cada ciclo de carga se supera ligeramente la deformación alcanzada en el mismo escalón de carga del ciclo anterior. En segundo lugar, los ciclos de descarga registran deformaciones ligeramente superiores a los mismos escalones en ciclo de carga. Estas tendencias son, en todo caso, menos pronunciadas que en el ensayo A.

Paralelamente, a partir de la distribución de deformaciones verticales a lo largo del pilote, se deduce que el acortamiento experimentado por el mismo bajo la carga máxima de 1000 kN en cabeza es de 4,1 mm. A partir de los valores de movimiento vertical de la cabeza y acortamiento del pilote, de forma similar al ensayo A, es posible deducir el máximo asentamiento experimentado por la punta del pilote, que ha sido de 1,2 mm, que corresponde a una carga en la punta del orden de 520 kN.

Es importante destacar que, en este ensayo B, tanto con los registros de los extensómetros como con los de la fibra óptica, no se observa, al menos tan acusadamente, el pico aparentemente anómalo de deformación, tensión y carga axil a la profundidad de 9,4 m que se midió en el ensayo A. La distribución de deformaciones verticales, tensiones verticales y carga axil con la profundidad es, en ese sentido, más regular.

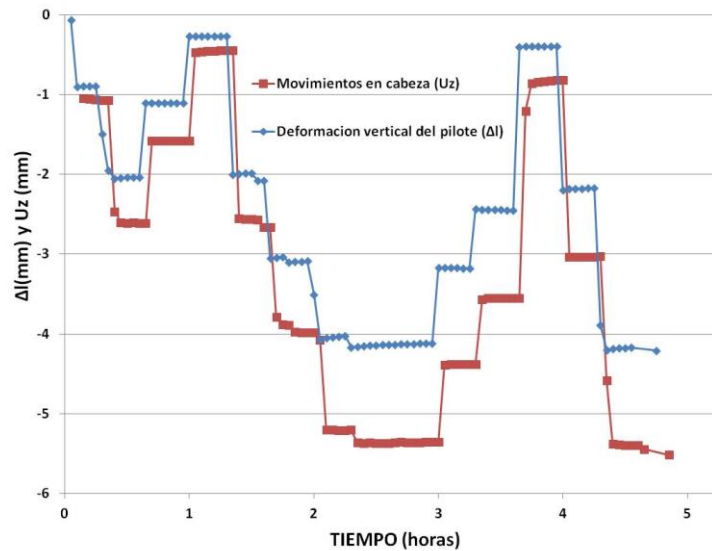


Figura VII-16: Movimientos en cabeza (LVDT) y deformación vertical del pilote durante el ensayo B

Comparando los resultados de las dos pruebas de carga estática, se observa, conforme referido, que las medidas de movimiento de la cabeza durante el ensayo B (Figura VII-16) son inferiores a las del ensayo A, con una diferencia bajo carga máxima de 2,2 mm. En la Tabla VII-7 se comparan los máximos movimientos en cabeza, acortamientos del pilote y asientos en punta de los dos ensayos, en los ciclos 3 y 2, respectivamente.

Tabla VII-7. Comparación movimientos en cabeza, acortamiento del pilote y asiento de la punta obtenidos durante ensayo A y B

	A (ciclo 3)	B (ciclo 2)
Máximo valor del movimiento en cabeza	-7,2 mm	-5,3 mm
Máximo valor de acortamiento del pilote:	-4,1 mm	-4,1 mm
Máximo asiento de la punta	-3,1 mm	-1,2 mm

En ambos ensayos se alcanza el mismo valor máximo de acortamiento del pilote: 4,1 mm. El asentamiento calculado de la punta del pilote ha resultado notablemente inferior en el ensayo B que, en el A, siendo la diferencia (1,9 mm) igual al asiento al final del ciclo 3 del ensayo A, y de un orden parecido al del asiento remanente en punta medido al final del ensayo A (2,6 mm).

VII.2.2.3 Tensiones medidas en el interior del pilote

Las curvas de distribución de tensiones son semejantes a las correspondientes a deformaciones, con una escala diferente. La tensión máxima registrada por los extensómetros es de 8000 kN/m², cuando el pilote se encuentra sometido a una carga de 1000 kN en cabeza. La tensión máxima obtenida por los sensores de fibra óptica es del mismo orden, manteniéndose constante con la profundidad hasta una profundidad de unos 12 m. En cualquier caso, se trata de valores similares a los registrados durante el ensayo A bajo las mismas cargas, exceptuando el pico observado a los 10 m en el ensayo A, el cual es prácticamente inexistente en el ensayo B (ver Figura VI-26y Figura VI-27).

VII.2.2.4 Cargas axiales en el pilote

De igual manera que en los apartados anteriores, se observa una clara distinción de dos zonas en función de la respuesta tenso-deformacional del pilote. A lo largo de los primeros 12 metros, donde el pilote se encuentra rodeado por materiales blandos de baja resistencia, el pilote no transmite prácticamente carga al terreno. A partir de esta profundidad, el pilote transmite la carga por fuste el terreno, más resistente. En los metros inferiores se produce una disminución casi lineal de la carga hasta la punta del pilote, a la que llegan alrededor de 600 kN de los 1000 kN aplicados en cabeza.

VII.2.2.5 Carga en la punta del pilote

Como ya se ha mencionado anteriormente, una parte del total de la carga aplicada a la cabeza del pilote, se transmite al terreno a través del fuste. El resto se transmite a través de la punta. La estimación de la carga que se transmite a la punta del pilote se

ha realizado por duplicado, a partir de los datos registrados por los extensómetros y los sensores de fibra óptica (Figura VII-17).

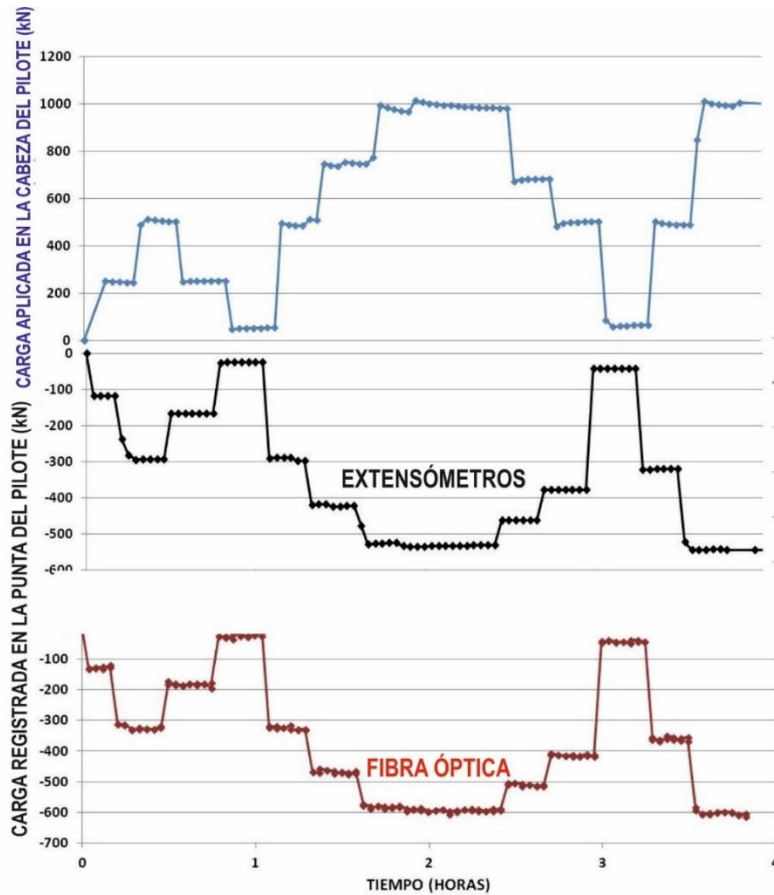


Figura VII-17: Evolución de la carga en la punta del pilote en el ensayo B

En ambos casos, la carga en la punta del pilote presenta una respuesta temporal inmediata a la carga aplicada en la cabeza. La máxima carga vertical registrada ha sido de 565 kN medida por los extensómetros y 600 kN por fibra óptica. Estos valores son similares al obtenido durante la primera prueba de carga estática (588 kN).

VII.2.2.6 Tensión transmitida al terreno por fuste

En la Figura VII-18 y Figura VII-1 se observa la variación de la tensión tangencial media entre terreno y fuste en función de la profundidad, correspondiente a la carga máxima de 1000 kN en diferentes momentos del ensayo B, a partir de los datos obtenidos de los extensómetros y los sensores de fibra óptica.

Tabla VII-8. Tensión tangencial entre terreno y fuste durante el ensayo B (extensómetros), en kN/m²

Tramos (m)	1CC-500 kN	2CC-750 kN	2CC-1000 kN	3CC-1000 kN
1,7 – 3,6	3,39	1,38	-3,09	-1,53
3,6 – 5,6	9,35	16,16	15,20	15,78
5,6 – 7,6	-0,49	6,18	5,15	5,59
7,6 – 10,4	-7,02	-6,13	-8,34	-9,79
10,4 – 13,1	5,56	20,81	28,10	33,58
13,1 – 16,1	18,76	47,40	55,59	62,78

Tabla VII-9. Tensión tangencial entre terreno y fuste durante el ensayo B (fibra óptica), en kN/m²

Tramos (m)	1CC-500kN	2CC-750kN	2CC-1000kN	3CC-1000 kN
1,7 – 3,6	2,24	1,13	-3,95	-6,23
3,6 – 5,6	12,37	13,48	14,49	18,03
5,6 – 7,6	5,45	10,90	12,91	11,36
7,6 – 9,8	-4,82	-17,31	-11,30	-16,55
9,8 - 12	-8,54	-6,51	-1,67	-4,26
12 - 14	27,03	49,20	69,54	75,06
14 – 16,1	24,45	44,50	57,15	67,98

La tensión transmitida por fuste se distribuye de la siguiente manera:

- Entre 1,7 y 3,6 metros, los valores de tensión tangencial entre terreno y fuste oscilan en torno a cero, entre valores negativos y positivos de muy bajo valor absoluto.
- Entre 3,6 y 5,6 metros de profundidad la carga transmitida al terreno por fuste oscila entre 14 y 18 kN/m² cuando el pilote está cargado con 1000 kN en cabeza. En este intervalo de profundidades se encuentra un nivel arenoso de mayor resistencia que las arcillas supra e infrayacentes.
- Entre 5,6 y 7,6 m el pilote transmite al terreno, consistente en materiales arcillosos de baja resistencia, una carga inferior a la calculada en el intervalo anterior, pero siempre positiva.
- Entre 7,6 y 9,8 m se observa en las dos figuras que se produce un cierto rozamiento negativo, es decir, el terreno “se cuelga” alrededor del pilote y le transmite carga. Estos valores negativos corresponden a un nivel de arenas

flojas de baja resistencia que se encuentra entre los materiales arcillosos descritos anteriormente y las gravas de la mitad inferior del pilote.

- En el intervalo de profundidades comprendido entre 9,8 y 12 (fibra óptica) o 13,1 (extensómetros) hay algunas diferencias entre los dos tipos de instrumentación usados. Ello se debe a la presencia de un sensor de fibra óptica a 12 metros, mientras que no existe un extensómetro entre 9,8 y 13,1 m de profundidad. Mientras los extensómetros detectan una transferencia de carga por fuste al terreno de unos 30 kN/m^2 , en términos de tensión tangencial, los sensores de fibra óptica identifican un nivel hasta los 12 metros de muy baja tensión tangencial entre pilote y terreno.
- Por último, en las mayores profundidades del pilote la transmisión de carga del pilote al terreno es considerable, con tensiones tangenciales superiores a 60 kN/m^2 en los últimos tres metros.

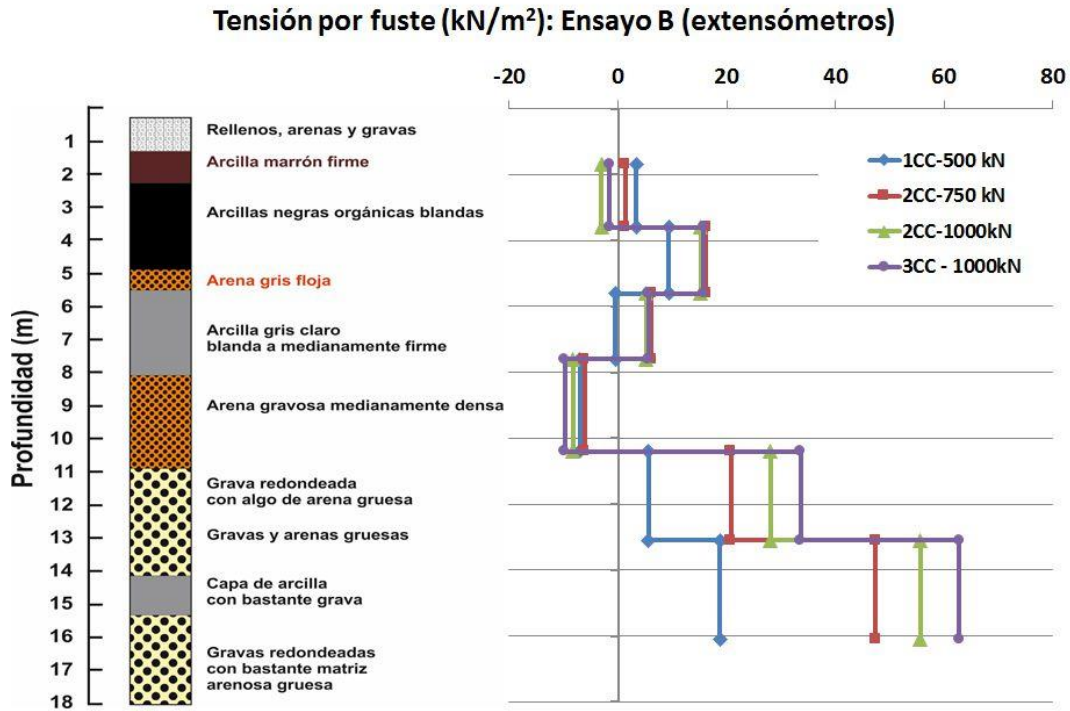


Figura VII-18: Tensión transmitida al terreno por fuste durante el ensayo B (extensómetros).

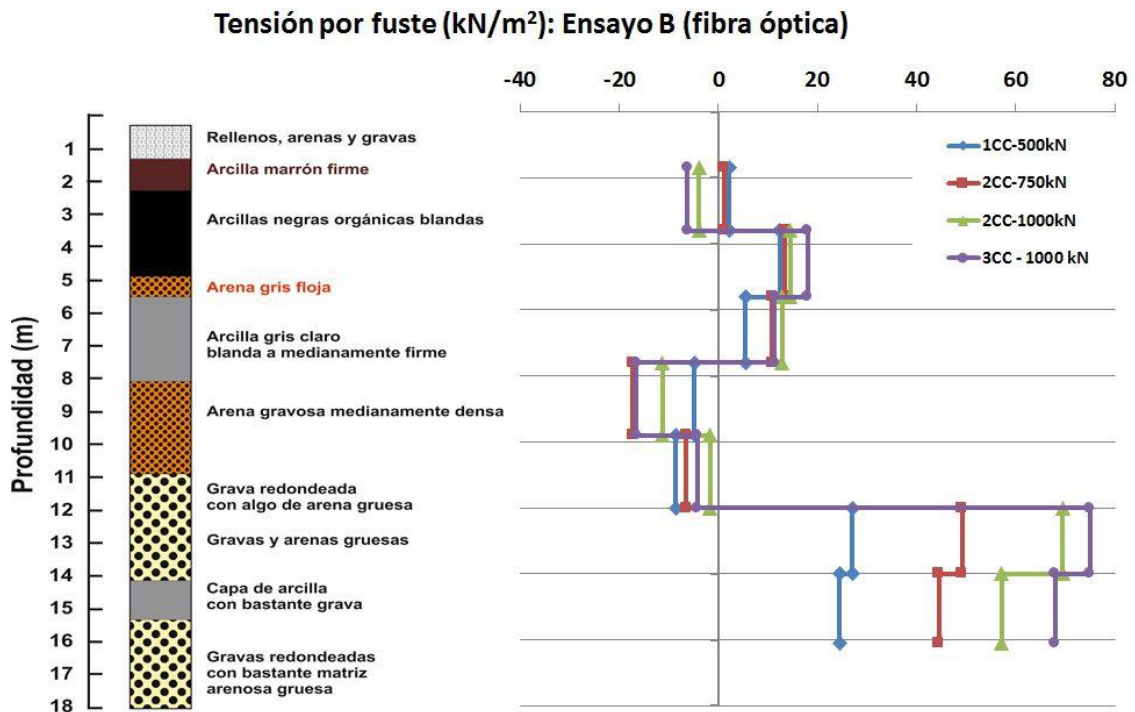


Figura VII-19. Tensión transmitida al terreno por fuste durante el ensayo B (Fibra óptica).

VII.2.2.7 Análisis de las cargas transmitidas al terreno

Como ya se ha razonado anteriormente, es interesante comparar los niveles de carga alcanzados durante el ensayo B, con el pilote sometido a 1000 kN en cabeza, con los valores de resistencia definidos durante el diseño e hinca del pilote (capítulo IV).

Ya se ha determinado que la carga transmitida al terreno por la punta del pilote es del orden de 550-600 kN, según la instrumentación utilizada. Se puede considerar un valor promedio de alrededor de 570 kN, bajo una carga de 1000 kN (Figura VII-17).

Por otro lado, la tensión transmitida al terreno por fuste se distribuye con la profundidad de forma variable, en función de la resistencia del terreno alrededor del pilote. Se muestra en la Figura VII-20 la relación entre la resistencia por fuste determinada durante la hinca del pilote mediante la prueba de carga dinámica e interpretada mediante el método CAPWAP, con la distribución de tensiones transferidas al terreno por fuste durante el escalón de máxima carga de los ensayos A y B, respectivamente.

Tabla VII-10. Comparación entre resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensión transmitida por fuste del pilote al terreno durante los ensayos A y B (extensómetros)

Tramo (m)	Ensayo A 5CC – 1000 kN	Ensayo B 3CC-1000 kN	CAPWAP Resistencia media por fuste (kN/m ²)
1,7 – 3,6	0,83	-1,53	2,47
3,6 – 5,6	18,24	15,78	9,59
5,6 – 7,6	0,07	5,59	24,08
7,6 – 10,4	-33,04	-9,79	18,03
10,4 – 13,1	31,99	33,58	23,45
13,1 – 16,1	80,08	62,78	67,46

Tabla VII-11. Comparación entre resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensión transmitida por fuste del pilote al terreno durante el ensayo B (fibra óptica)

Tramo (m)	Ensayo B 3CC-1000 kN	CAPWAP Resistencia media por fuste (kN/m ²)
1,7 - 3,6	-6,23	2,47
3,6 - 5,6	18,03	9,59
5,6 - 7,6	11,36	24,08
7,6 - 9,8	-16,55	14,63
9,8 – 12	-4,26	31,57
12 – 14	75,06	12,01
14 - 16,1	67,98	90,73

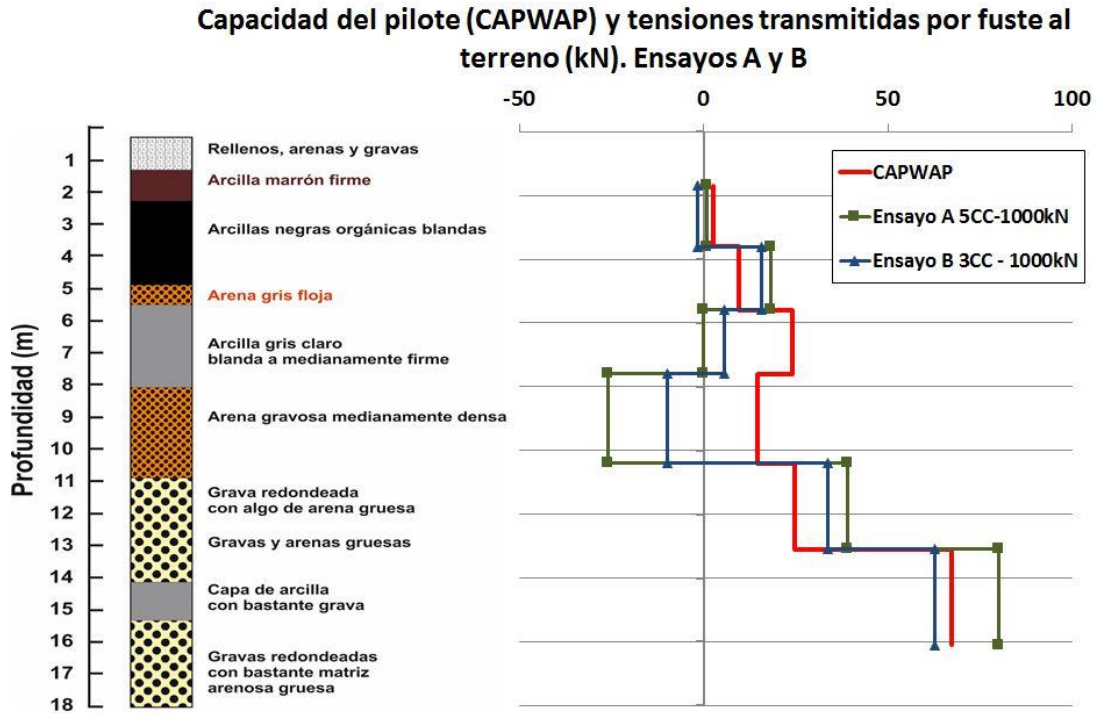


Figura VII-20. Relación entre la resistencia por fuste (CAPWAP) y la tensión tangencial transmitida por fuste al terreno durante los ensayos A y B (extensómetros)

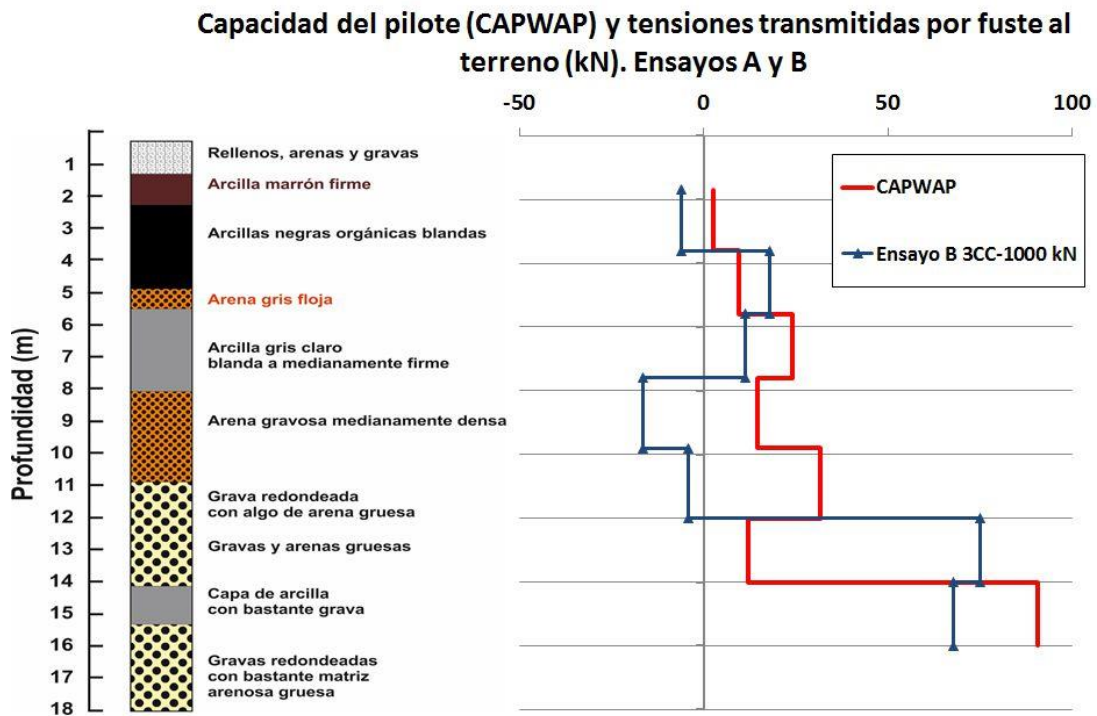


Figura VII-21. Relación entre la resistencia por fuste (CAPWAP) y la tensión tangencial transmitida por fuste al terreno durante el ensayo B (fibra óptica)

Se observa en la figura que la litología local justifica las curvas de distribución de tensiones transmitidas por fuste en los dos ensayos A y B que, a su vez, son relativamente próximas a los valores de la resistencia por fuste, salvo en la zona de la punta: es decir, que la resistencia por fuste está prácticamente agotada hasta la profundidad de 15 metros aproximadamente. A partir de esa profundidad, el terreno, de mayor resistencia, ofrece una mayor capacidad de soporte. También se verifica que durante la hincada del pilote y la determinación de la capacidad portante del pilote mediante el método CAPWAP se encuentra un nivel de poca resistencia entre las profundidades 7,3 y 9,4 metros, que se corresponde con el nivel de arenas flojas identificado en la litología y que coincide con la zona de rozamientos negativos registrados durante los ensayos A y B. En resumen, se deduce que el resguardo de seguridad frente a capacidad portante se localiza en la resistencia por punta y, en lo que se refiere a la resistencia por fuste, en la zona próxima a la punta.

Comparando las cargas transferidas al terreno por punta y por fuste durante los dos ensayos de carga estática A y B con las capacidades por punta y por fuste determinadas durante la hincada del pilote mediante el método CAPWAP, se obtienen los valores enunciados en la Tabla VII-12.

Tabla VII-12. Capacidad del pilote (método CAPWAP) y cargas por punta y por fuste durante los ensayos A y B

CAPWAP	Resistencia por fuste (kN)	Resistencia por punta (kN)	Capacidad portante total del pilote (kN)
	711,3	1800	2511,3
	Carga por fuste (kN)	Carga por punta (kN)	Carga total (kN)
Ensayo A	412	588	1000
	58%	33%	40%
	C.S. = 1,7	C.S. = 3,1	C.S. = 2,5
Ensayo B (ext.)	455	545	1000
	64%	30%	40%
	C.S. = 1,6	C.S. = 3,4	C.S. = 2,5
Ensayo B (F.O.)	395	605	1000
	55%	34%	40%
	C.S. = 1,8	C.S. = 3,0	C.S. = 2,5

Se observa que los valores de la carga por fuste y por punta son muy similares en los dos ensayos. En ambos casos, bajo la acción de una carga de 1000 kN el pilote trabaja, aproximadamente, a un 60% de su resistencia por fuste y a un 33% de su resistencia por punta, lo que equivale a unos coeficientes de seguridad por fuste de 1,7 y por punta de 3,1.

VII.3 ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL PILOTE: Ensayo C

El ensayo C es un ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno que tuvo lugar durante dos semanas, entre los días 26/6/2013 y 11/7/2013. El principal objetivo de este ensayo es analizar la respuesta térmica del pilote, cargado en cabeza con 1000 kN y sometido a una inyección de calor, según la secuencia de fases descrita en la Figura VI-30 y la Tabla VII-13: Se aplicaron tres escalones de potencia inyectada, denominados fases 1, 2 y 3 respectivamente. La fase 4 corresponde al período adicional de recuperación térmica una vez terminado el ensayo, y discurre desde el 11/7/2013 al 30/7/2013.

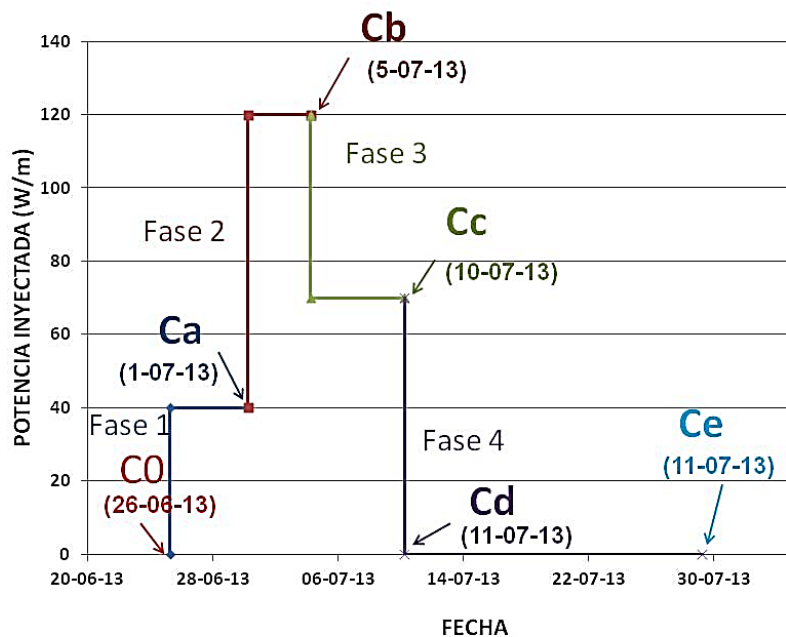


Figura VII-22: Puntos estudiados en el ensayo C.

Tabla VII-13. Momentos específicos identificados durante el ensayo C

Punto del ciclo	Fecha	Hora	Observaciones
C0	26/06/2013	10:57	Instante anterior al comienzo del ensayo
Ca	01/07/2013	12:27	Final de la fase 1
Cb	05/07/2013	12:27	Final de la fase 2
Cc	10/07/2013	14:30	Final de la fase 3
Cd	11/07/2013	11:54	Final del ensayo
Ce	30/07/2013	10:07	Tras 19 días de recuperación térmica

En este apartado se analizan los resultados obtenidos con los diferentes dispositivos de medida, así como el comportamiento termo-mecánico del pilote deducido a partir de los mismos.

VII.3.1 Temperaturas medidas en el interior del pilote

En la Figura VII-23 se reproduce la evolución de la temperatura en el pilote a lo largo del ensayo C, mostrándose en la Figura VII-24 los incrementos de temperatura con respecto a una temperatura inicial de referencia correspondiente al instante C0. Con el fin de facilitar el análisis de los resultados, se representa en ambas figuras la columna litológica del terreno.

En primer lugar, se observa que la temperatura decrece con la profundidad en todos los escalones de potencia inyectada. Cabe destacar que en los 6 - 8 primeros metros las oscilaciones de temperatura son algo más irregulares que a profundidades mayores. Estos metros más superficiales se encuentran fuertemente influenciados por la temperatura exterior, tal como describen McCartney & Murphy (2012). Ello dificulta algo la disipación de calor a esas profundidades teniendo en cuenta la época del año (verano) en que se realizaron los ensayos. Entre 8 y 16 metros, en todas las lecturas, la temperatura se hace más regular y constante, siendo la disminución de temperatura con la profundidad de entre uno y dos grados.

Al inicio del ensayo (C0), la temperatura del pilote es de aproximadamente 20° en toda su longitud. A continuación, los efectos de la inyección de potencia son bien evidentes en la temperatura, con incrementos de la misma máximos en el instante Cb, tras aplicar el segundo, y mayor, escalón de potencia (120 W/m). La temperatura, en ese instante Cb, varía entre los 35-36°C en los metros superiores, y los 30-31°C en los metros inferiores. En términos de incrementos de temperatura, durante este momento

Cb las variaciones son de 17°C, a 4 metros de profundidad, y de 12°C, en los metros inferiores del pilote con respecto al momento C0.

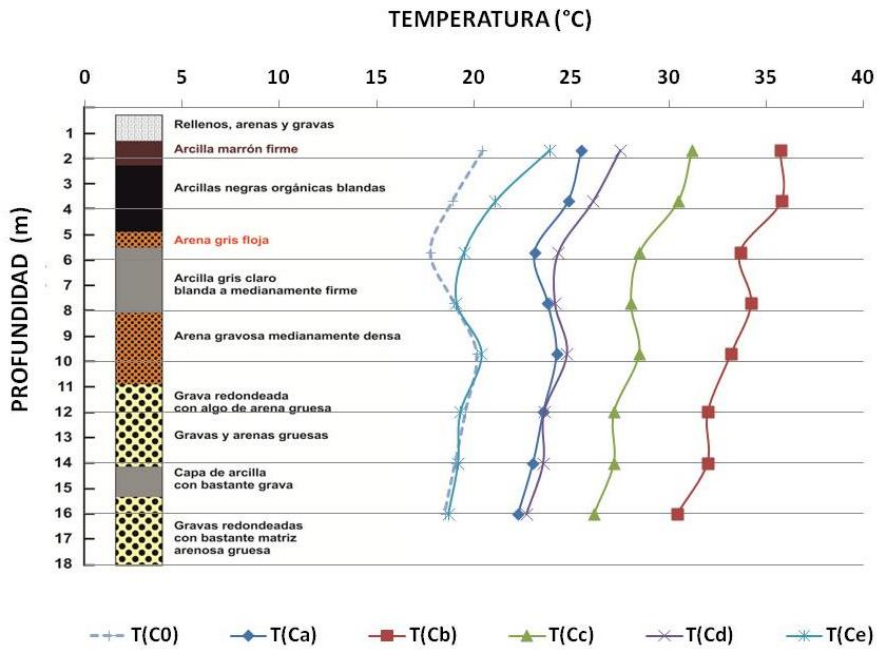


Figura VII-23. Variación de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo C

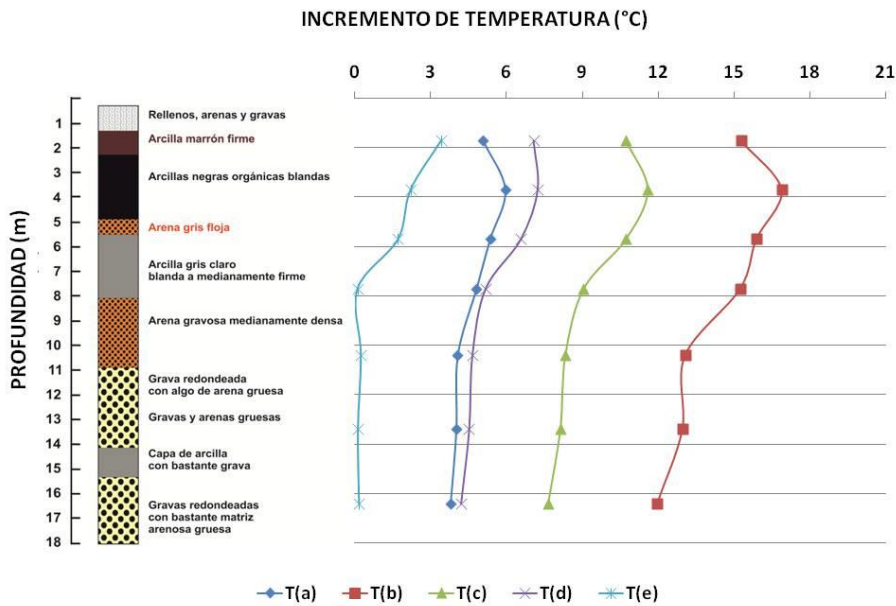


Figura VII-24. Incremento de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo C

En el instante Ca, tras la inyección del primer escalón de potencia (40 W/m), la distribución de temperaturas es semejante a la del instante Cd, tras cesar el ensayo. Se verifica que es necesario, por lo tanto, un cierto tiempo para la disipación de las temperaturas generadas por la inyección de potencia. Entre el instante Cd y el Ce, tras 19 días, la temperatura decrece una media de 5°C, recuperándose la temperatura inicial, conforme comentado, en los metros inferiores del pilote.

En el instante Ce, al final del ensayo, tras la fase de recuperación, se observa que mientras que entre los 8 y los 16 m de profundidad se ha recuperado la temperatura del momento C0, previo al ensayo, en los 6 metros superiores la temperatura es mayor en Ce que en C0, con una diferencia de tres grados a dos metros de profundidad. Como se ha explicado antes, ello puede explicarse, al menos parcialmente, por la influencia de la temperatura ambiente exterior, teniendo en cuenta que C0 es el 26 de junio, con una temperatura atmosférica de 22,9°C, y Ce es el 30 de julio, con una temperatura atmosférica de 29,8°C (Tabla VII-14), es decir una diferencia de 7 °C en superficie, que se traduce en una diferencia de unos 3°C a 2 metros de profundidad, lo que parece razonable. Por otro lado, las capas superiores del terreno están compuestas predominantemente por arcillas (negras orgánicas; arcilla gris floja), materiales que presentan una inercia térmica superior a las de las gravas subyacentes. Las gravas permiten una disipación mayor del calor que las arcillas, lo que permitiría explicar la rápida recuperación de temperaturas al finalizar el ensayo entre los 8 y los 16 metros de profundidad.

Tabla VII-14. Temperatura ambiente y temperatura en los sensores de fibra óptica. Ensayo C

	Fecha_hora	T°C amb	T°C registrada por los sensores de Fibra óptica (T _{F0})							
			1,70	3,70	5,70	7,70	9,70	12,00	14,00	16,00
Co	27/06/2013 9:30	22,9	22,52	21,42	20,12	21,00	22,00	21,28	20,76	20,18
Ca	01/07/2013 12:27	30,4	25,50	24,83	23,11	23,78	24,23	23,56	23,03	22,26
Cb	05/07/2013 12:27	32,3	35,72	35,77	33,66	34,23	33,20	32,01	31,99	30,45
Cc	10/07/2013 14:30	26,2	31,07	30,51	28,56	28,03	28,49	27,24	27,17	26,06
Cd	11/07/2013 11:54	23,1	28,92	27,69	25,73	25,47	25,99	24,88	24,76	23,83
Ce	30/07/2013 10:07	29,8	23,85	21,08	19,46	19,08	20,37	19,27	19,15	18,65

A partir del incremento de temperatura (Figura VII-24) es posible determinar la deformación libre teórica (Figura VII-25) que experimentaría el pilote si no estuviese limitado en sus movimientos por la punta y por el fuste.

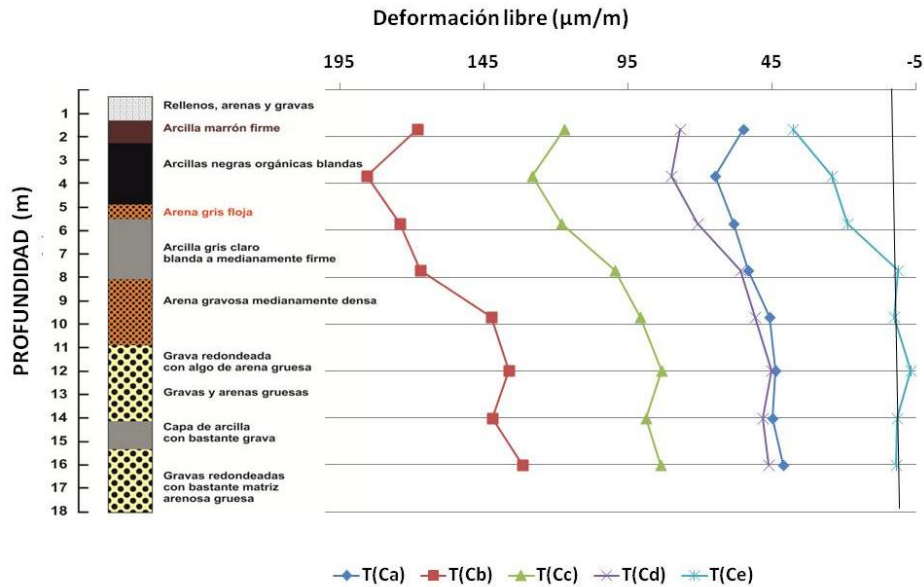


Figura VII-25: Evolución de la deformación libre durante el ensayo C (fibra óptica)

En la Figura VII-26 se muestra la evolución de la temperatura a lo largo del ensayo en cada sensor, a diferentes profundidades, observándose cómo esta evolución refleja claramente los momentos de máxima potencia inyectada así como el período de recuperación al finalizar el ensayo C.

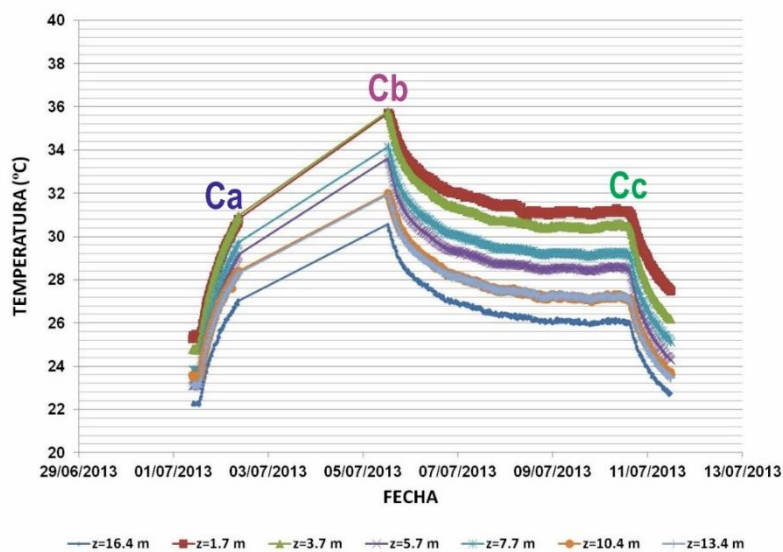


Figura VII-26: Evolución de la temperatura durante el ensayo C (Fibra óptica)

VII.3.2 *Movimientos medidos en la cabeza del pilote*

Conforme se describió en el Capítulo V, se realizaron tres escalones de inyección de calor en el pilote: una primera fase de inyección de 40 W/m, seguida de una segunda fase de inyección de 120 W/m y una última fase de inyección de 70 W/m. Se recuerdan a continuación los movimientos verticales y horizontales registrados en la cabeza del pilote durante el ensayo C (Figura VII-27).

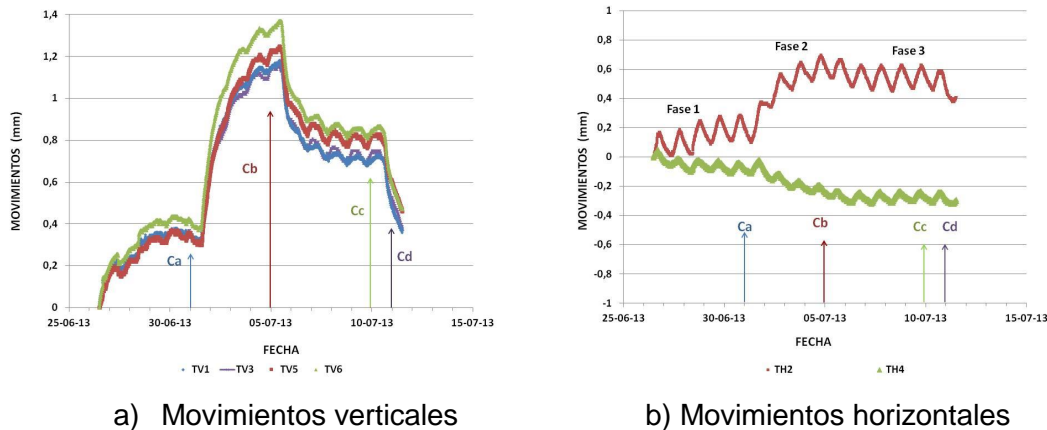


Figura VII-27. Movimientos detectados en la cabeza del pilote durante el ensayo C

En términos generales, al calentarse, el pilote tiende a dilatarse. El **movimiento vertical** observado es, por tanto, de dilatación, y su evolución se corresponde con los escalones de potencias inyectadas, aunque la respuesta en levantamiento no se observa inmediatamente, sino que acompaña más directamente las variaciones de temperatura, que, conforme se muestra en la Figura VII-1, presentan una evolución temporal en cada escalón de potencia inyectada. El máximo movimiento vertical de levantamiento, registrado en el instante Cb, fue de 1,23 mm, lo que equivale a un 0,0073% de la longitud total del pilote (16,8 metros). Si el pilote no hubiese tenido restricciones para dilatarse, en el momento Cb la dilatación máxima habría sido de 193 $\mu\text{m/m}$ (Figura VII-25), esto es, un 0,0193 %.; Suponiendo un asentamiento nulo en la punta, el levantamiento de la cabeza habría sido de 3,24 mm, claramente superior al medido. En el punto Cd, una vez finalizado el ensayo, al igual que sucede con las temperaturas, no se ha recuperado el estado inicial; lo cual sólo acontece en el instante Ce, incluso con un pequeño movimiento de asentamiento. Estos movimientos se analizarán en conjunto con las deformaciones internas.

Se observa que los **movimientos horizontales** también responden claramente a los escalones de carga térmica, y más exactamente a las variaciones de temperatura. El movimiento horizontal máximo según el eje x es de + 0,61 mm y de -0,23 mm en el eje

y. La resultante es un movimiento hacia el sur de 0,65 mm. La oscilación térmica diaria, correspondiente a las variaciones de temperatura atmosférica entre el día y la noche, se aprecian claramente en estos movimientos, pudiendo contribuir hasta en $\pm 0,3$ mm al valor del desplazamiento máximo.

VII.3.3 Deformaciones medidas en el interior del pilote

Gracias a la instrumentación instalada, extensómetros y sensores de fibra óptica, se dispone de registro de las deformaciones verticales internas del pilote. No obstante, sólo los extensómetros de cuerda vibrante permiten estimar directamente la deformación realmente producida a lo largo del pilote. La instrumentación de fibra óptica proporciona la deformación no desarrollada, por lo que la deformación real debe deducirse de ésta substrayéndola de la deformación teórica por dilatación térmica en el caso de pilote libre, sin constricciones. En la Figura VII-28 se representa la evolución de las deformaciones observadas mediante los extensómetros de cuerda vibrante.

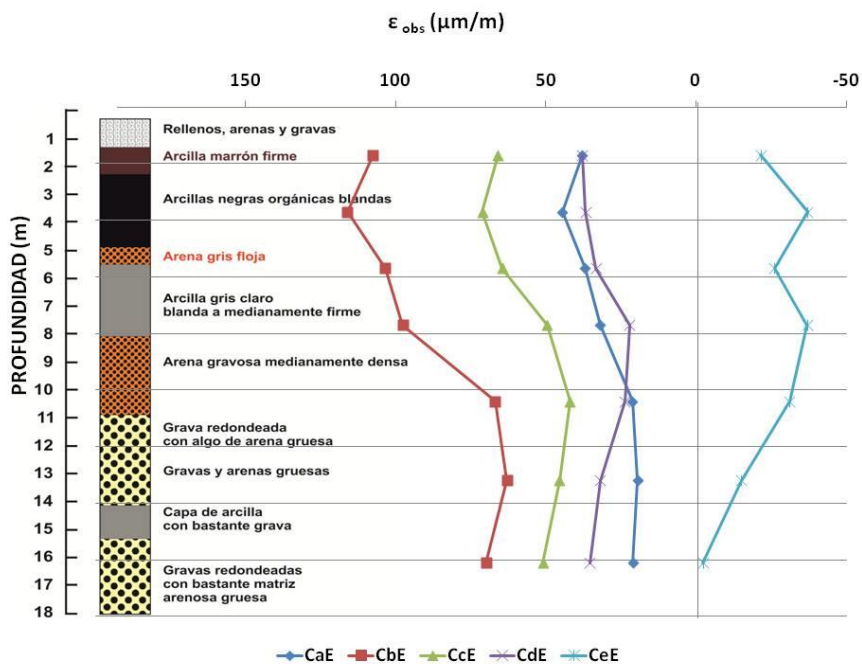


Figura VII-28: Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ensayo C (extensómetros)

Todas las curvas definen deformaciones de tracción (positivas), salvo en el momento Ce, tras el período de recuperación térmica, 19 días después de finalizado el ensayo. Esto resulta coincidente con el asentamiento en cabeza en Ce antes comentado. Las deformaciones de tracción son máximas en el instante Cb, de máxima temperatura en el interior del pilote, alcanzando 120 $\mu\text{m}/\text{m}$. En el último punto del ensayo (Cd), inmediatamente después de su finalización, aun se registran deformaciones de tracción de hasta 40 $\mu\text{m}/\text{m}$, mientras que la deformación de compresión máxima en Ce es del orden de 38 $\mu\text{m}/\text{m}$.

La distribución en profundidad debe reflejar no sólo la variación de temperatura, sino también la resistencia a la deformación que ejerce el terreno alrededor del pilote. Esto se analizará más adelante. En todo caso, el registro de estos sensores muestra mayores deformaciones en los primeros metros, en todos los escalones de potencia, y menores a partir de 10 metros de profundidad. Esta diferencia puede atribuirse al terreno de alrededor; más blando y menos resistente en los primeros metros, arcillas orgánicas y arcillas blandas. Al ser más blando, el material ofrece menor resistencia a la dilatación térmica que en la zona de gravas, donde la resistencia es mayor, y por tanto las deformaciones son menores y más homogéneas. No debe descartarse la posible influencia de una mayor homogeneidad de temperaturas en el tramo inferior del pilote.

A partir de la distribución de deformaciones verticales a lo largo del pilote, se deduce que el alargamiento experimentado por el mismo bajo la carga máxima de 1000 kN y 120 W/m de potencia aplicada en cabeza es de unos +1,6 mm (dilatación). El movimiento correspondiente en cabeza del pilote, medido con los LVDT, fue de +1,23 mm. A partir de ahí puede deducirse que el asentamiento experimentado por la punta del pilote ha sido de unos 0,37 mm (ver Figura VI-44), correspondiendo este asentamiento a una carga por punta del orden de 950 kN, medido con la fibra óptica (Figura VII-29).

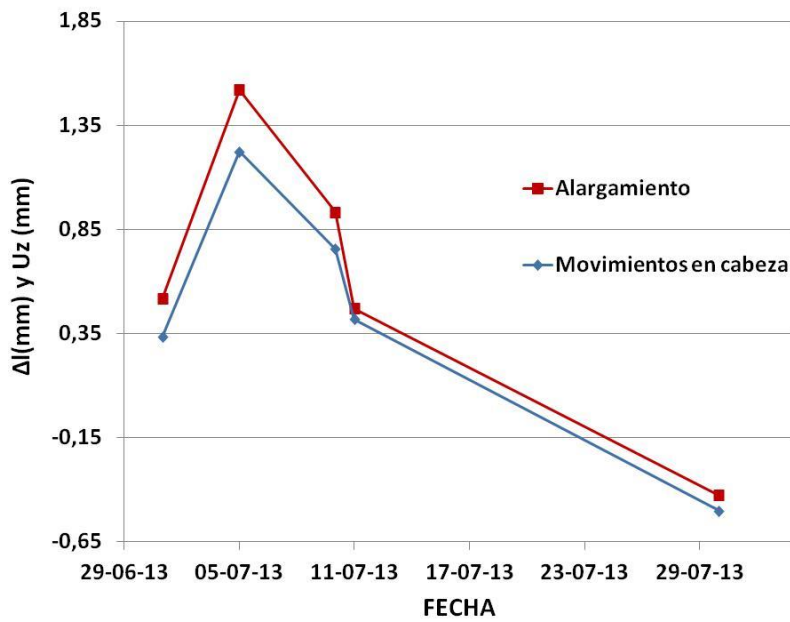


Figura VII-29. Movimientos en cabeza (LVDT's) y deformación vertical del pilote (compresiones signo negativo) en cabeza durante el ensayo C

Se muestran a continuación los valores de máximo movimiento en cabeza, máximo acortamiento del pilote y asiento en punta en el momento C_b, de máxima inyección de calor. Se comparan los valores obtenidos con los correspondientes a los ensayos de carga estática, A y B (Tabla VII-15), todos ellos medidos bajo carga mecánica de 1000kN en cabeza de pilote.

Tabla VII-15. Comparación movimientos en cabeza, acortamiento del pilote y asiento de la punta obtenidos durante ensayo A y B

	A	B	C
Máximo valor de movimientos en cabeza	-7,2 mm	-5,3 mm	+1,2 mm
Máximo valor de acortamiento/dilatación del pilote:	-4,1 mm	-4,1 mm	+1,6 mm
Asiento de la punta	-3,1 mm	-1,2 mm	-0,4 mm

Se observa que la inyección de calor produce el efecto contrario a la aplicación de una carga mecánica, esto es, una dilatación del pilote. Debido a esta dilatación, la cabeza del pilote se mueve hacia arriba por efecto del calor, es decir, en sentido contrario al del movimiento debido a la aplicación de cargas mecánicas. En la punta, al contrario,

el efecto del calentamiento y consecuente dilatación del pilote se traduce en un asentamiento, en el mismo sentido, aunque de menor magnitud que el producido por 1000 kN de carga mecánica aplicados en cabeza.

VII.3.4 Tensiones en el interior del pilote

Como ya ha quedado demostrado hasta el momento, las diferentes potencias térmicas inyectadas al pilote, inducen en éste una tendencia a la dilatación. Sin embargo, debido a las constricciones impuestas por fuste y punta, no es posible desarrollar toda la deformación térmica teórica libre. Esta deformación no desarrollada genera tensiones internas de origen térmico (Figura VII-30).

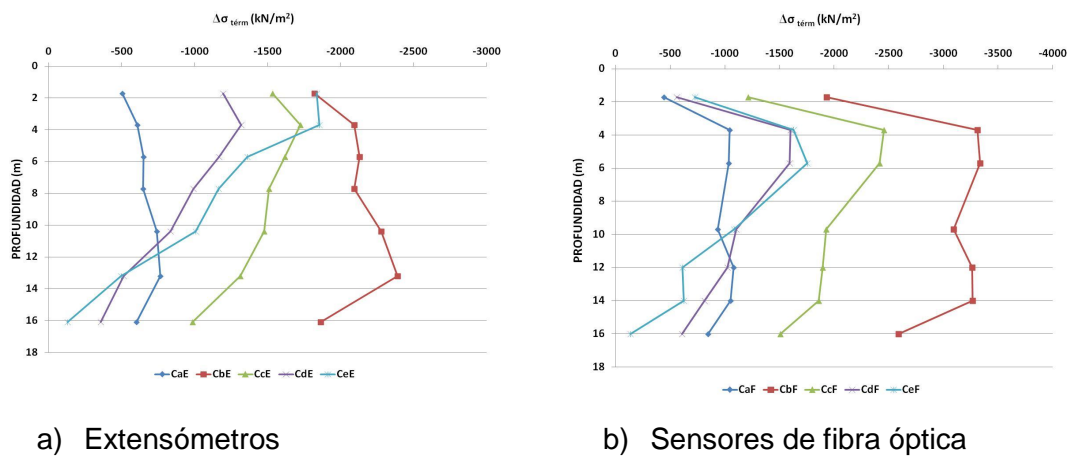


Figura VII-30. Evolución de los perfiles de tensión de origen térmico durante el ensayo C

La fibra óptica en los primeros metros registra una tendencia a incremento nulo de tensión en cabeza de pilote, como es coherente, debido a la falta de restricción a la dilatación en este extremo del pilote, puesto que la carga mecánica se mantiene constante en 1000 kN. Los extensómetros no muestran de forma tan evidente esa tendencia. El incremento de tensión térmica obtenida mediante los sensores de fibra óptica es superior a los registrados a partir de los extensómetros. El máximo incremento de tensión de origen térmico (Cb) en los extensómetros es de -2500 kN/m² (valores negativos indican compresiones) a una profundidad de 13 metros, mientras que la fibra óptica registra un valor de unos -3300 kN/m², entre las profundidades de 4 y 14 m.

En el primer escalón de inyección de potencia (Ca), 700 W, el pilote sufre un incremento medio de tensión de compresión de alrededor de -1000 kN/m², medido con

los sensores de fibra óptica, o bien de, aproximadamente, -700 kN/m^2 (Figura VII-30) medido con los extensómetros. Ambas instrumentaciones muestran una distribución aproximadamente uniforme (salvo en los extremos) de la tensión a lo largo de toda la profundidad del pilote en este escalón.

En el segundo escalón de inyección de potencia (Cb), 2100 W, los extensómetros muestran una distribución de tensión de compresión constante entre los 3 y los 9 m, aproximadamente, de unos -2100 kN/m^2 , aumentando a partir de los 10 metros hasta -2500 kN/m^2 para posteriormente disminuir hasta alrededor de -1800 kN/m^2 . Los sensores de fibra óptica registran unos valores de tensión de compresión superior a los extensómetros, aproximadamente de -3000 kN/m^2 .

En el tercer escalón de inyección de potencia (Cc) ,1050W, menor ya que el anterior, los extensómetros reflejan unas tensiones intermedias entre los 2 escalones de potencia anteriores, disminuyendo la tensión de compresión de origen térmico con la profundidad, de -1700 kN/m^2 hasta aproximadamente -1100 kN/m^2 a los 16 m. La tensión medida con la fibra óptica también registra un valor intermedio entre en escalón Ca y el Cc, tensión que también disminuye con la profundidad, pero registrando unos valores algo superiores a los extensómetros, alrededor de -2500 kN/m^2 en cabeza y -1600 kN/m^2 en la punta, sin que esté clara la razón de esta diferencia de valores entre los resultados obtenidos con los dos tipos de sensores; aunque podría decirse que las curvas obtenidas con la fibra óptica presentan un aspecto más regular.

Una vez acabado el ensayo (Cd), e incluso 15 días después (Ce), ni la fibra ni los extensómetros detectan una completa disipación de las tensiones de origen térmico. En la zona inferior del pilote, la tendencia a la disipación de estas tensiones es más clara, en todo caso. Conforme se comentó, al final del ensayo el perfil de temperaturas tampoco se recupera en la mitad superior del pilote; en todo caso, la inercia en la disipación de estas tensiones de origen térmico parece ser mayor que la de las temperaturas, lo que podría estar relacionado con las diferencias de temperatura entre suelo y pilote a diferentes profundidades.

Este análisis del ensayo C se puede realizar considerando la acción conjunta de las diferentes sollicitaciones térmicas aplicadas en forma de escalones térmicos de diferente potencia, más la tensión de origen mecánico originada por la carga de 1000 kN, 8163 kN/m^2 , aplicada en cabeza (Figura VII-31).

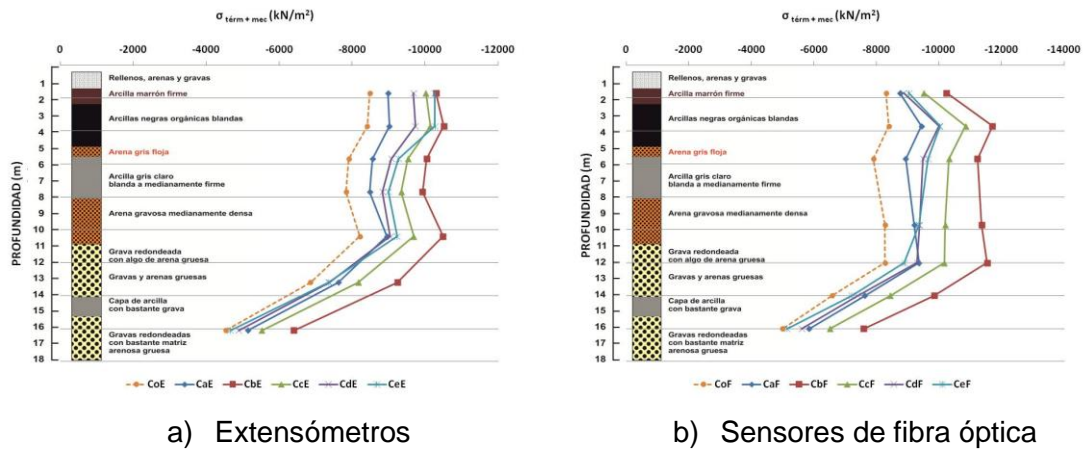


Figura VII-31. Evolución de las curvas de tensión total a lo largo del ensayo C

El incremento de tensión total, en el interior del pilote, medido por la fibra óptica es de alrededor de -3500 kN/m^2 en el momento de máxima potencia inyectada, 2100 W, siendo uniforme desde los 4 y hasta los 12 metros de profundidad; a partir de esa profundidad disminuye la tensión hasta la punta del pilote, de forma parecida a la tensión mecánica (curvas C0E y C0F). En cabeza, como es lógico, las curvas de todos los escalones tienden a converger en el valor inicial de -8163 kN/m^2 , que es la tensión producida por el gato. En los extensómetros la evolución del perfil de tensiones es muy parecida, con la salvedad de los primeros metros, donde la tendencia hacia la tensión de -8163 kN/m^2 no es tan clara.

VII.3.5 Cargas axiales medidas en el interior del pilote

En la Figura VII-32 se observa la evolución a lo largo del ensayo C del perfil de carga axial total, suma de carga térmica más mecánica, registrada por los extensómetros y los sensores de fibra óptica. Se verifica que el incremento de carga axial llega a ser de hasta 400 kN, correspondiente al momento Cb, al final de la fase 2 de calentamiento del pilote, mediante la inyección de una potencia térmica de 2.100 W, con una relación de 120 W/m y un salto térmico de 3°C . Este valor es considerable, considerando que la carga inicial es de 1000 kN. Es importante recordar, no obstante, que estas condiciones son extremas, muy por encima de los parámetros térmicos de funcionamiento en una instalación geotérmica en condiciones de explotación normales.

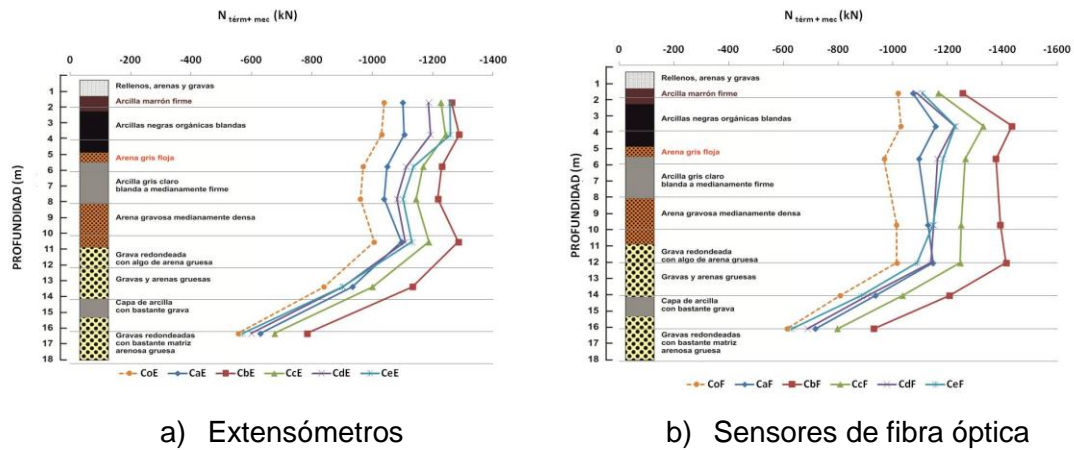


Figura VII-32: Evolución del perfil de carga total (mecánica más térmica) en el interior del pilote durante el ensayo C

Si bien en las curvas obtenidas a partir de los datos de extensómetros no se aprecia con tanta claridad, en las curvas medidas a partir de la fibra óptica se observa que todas las curvas tienden a converger a 1000 kN, que es la fuerza que es aplicada por el gato.

El incremento de carga se mantiene relativamente uniforme entre 3,9 y 12,1 m de profundidad en todas las fases del ensayo. A 12 metros, el salto de carga axil entre C0 y Cb es de 400 kN. A partir de esta profundidad, la carga total disminuye hacia la punta. En el momento Cb, el sensor localizado a 16,1 metros, cerca de la punta, registra un valor de carga total (mecánica + térmica) de 940 kN, siendo la carga puramente mecánica aproximadamente 600 kN. El salto de carga axil entre C0 y Cb resulta ser de 340 kN. Esto significa que a lo largo de la parte superior del pilote, entre los 4 y los 12 m, el terreno no absorbe el incremento de carga axil sino que lo transmite a la zona inferior del pilote. De los 400 kN de carga térmica suplementaria existentes a 12 metros de profundidad, a los 340 kN de la punta, el terreno ha absorbido por fuste necesariamente 60 kN de carga térmica en los metros inferiores del pilote.

La recuperación del pilote al cesar la aplicación de la carga térmica es mayor en la zona de la punta, conforme se comentó al analizar las tensiones, mientras que en la parte superior no es capaz de recuperarse en igual proporción. El terreno inferior presenta por su composición mineralógica y granulométrica una conductividad mayor, con lo que es capaz de disipar más rápidamente las cargas térmicas. El terreno

superior, por el contrario, presenta una conductividad térmica inferior, además de encontrarse sometido a las oscilaciones térmicas del exterior.

VII.3.6 *Carga en la punta del pilote*

Como ya se ha mencionado anteriormente, una parte del total de la carga aplicada al pilote, se distribuye a través del fuste y se transmite al terreno que lo rodea. El resto, se transmite a través de la punta. Con el fin de valorar la recuperación del pilote con el tiempo, se ha incorporado a las gráficas un último momento - Cf - tres meses tras la finalización del ensayo C. El cálculo de la carga que se transmite a la punta del pilote se ha realizado por duplicado: en primer lugar considerando únicamente las cargas de origen térmico, y en segundo lugar, las cargas totales, resultado de sumar las cargas mecánicas y térmicas.

VII.3.6.1 *Carga térmica en la punta del pilote*

En primer lugar, se representa la evolución de carga térmica en la punta del pilote a lo largo del ensayo C, a partir de los datos obtenidos de los extensómetros y los sensores de fibra óptica (Figura VII-33), instalados a mayor profundidad. La máxima carga térmica en la punta del pilote es de 240 kN con los extensómetros y de 340 kN con la fibra óptica, coincidiendo temporalmente en ambos casos con el momento Cc del ensayo.

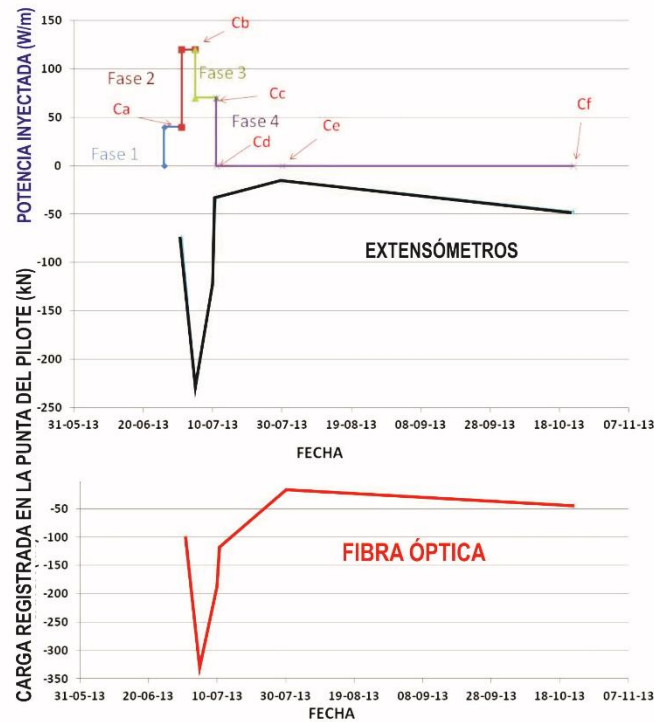


Figura VII-33: Variación de la carga térmica en la punta del pilote durante el ensayo C.

VII.3.6.2 Carga total en la punta del pilote

A continuación, se muestra la evolución de la carga total (mecánica + térmica) en la punta del pilote a lo largo del ensayo C, obtenida a partir de los datos de extensómetros y fibra óptica instalados a mayor profundidad (Figura VII-34). La máxima carga total en la punta del pilote es de 950 kN con los extensómetros y de 800 kN con la fibra óptica, coincidiendo temporalmente en ambos casos con el momento Cb del ensayo.

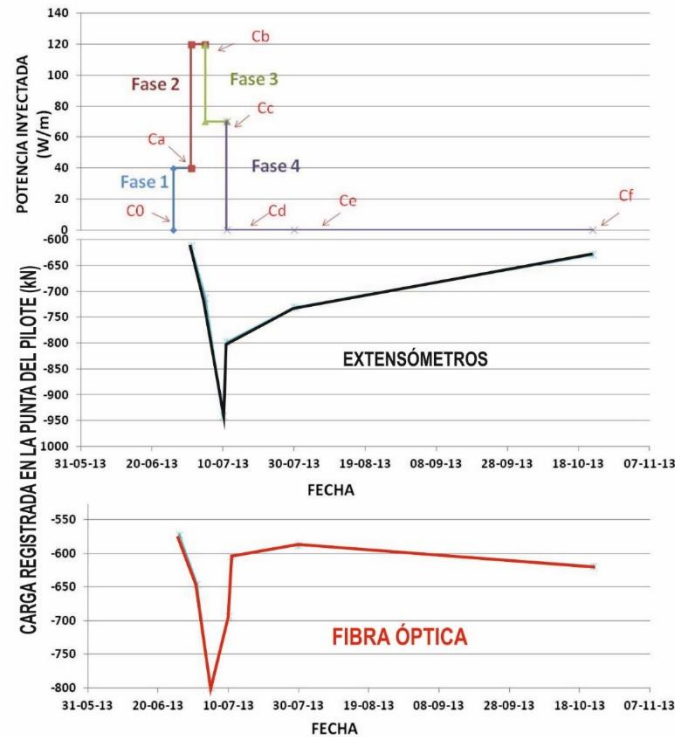


Figura VII-34: Variación de la carga total en el sensor de fibra óptica (16 m de profundidad) del pilote durante el ensayo C.

La máxima carga, de compresión, que le llega a la punta del pilote es, por tanto, de -950 kN medido con fibra óptica y de -800 kN con los extensómetros.

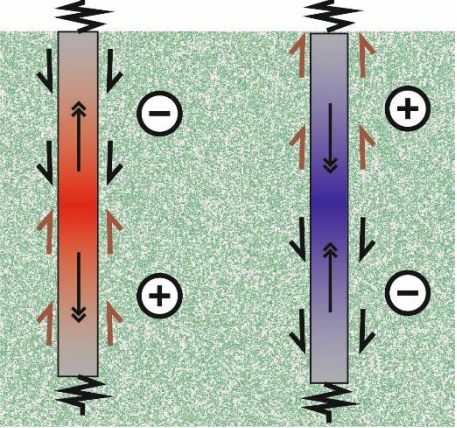
VII.3.7 Tensión tangencial entre fuste y terreno

Se distinguen en este apartado las tensiones internas originadas por la deformación no desarrollada de origen térmico, denominadas tensiones térmicas, y la suma de éstas con las tensiones generadas por la aplicación de una carga mecánica de 1000 kN en la cabeza del pilote, denominadas tensiones totales (térmicas + mecánicas).

En las siguientes figuras se muestran los perfiles de tensión tangencial entre fuste y terreno a lo largo del ensayo C determinados a partir de los registros de los extensómetros (Figura VII-35) y los sensores de fibra óptica (Figura VII-36). Los valores se ofrecen en la Tabla VII-16. Para facilitar la comprensión de los valores, se recuerda el criterio de signos convenido al inicio de esta tesis.

Tabla VII-16. Tensión tangencial de origen térmico entre fuste y terreno durante el ensayo C

**TRANSMISIÓN DE CARGAS AL TERRENO
CRITERIO DE SIGNOS**



	Intervalos profundidad	Ca	Cb	Cc	Cd
	Extensómetros	0,3 – 1,7	-31,6	-113,8	-95,9
1,7 - 3,6		-4,5	-12,8	-8,6	-6,0
3,6 - 5,6		-2,1	-1,4	4,6	6,8
5,6 - 7,6		0,4	1,4	4,6	7,5
7,6- 10,4		-3,1	-5,6	1,0	5,1
10,4 - 13,2		-0,8	-3,6	5,1	10,5
13,2 - 16,1		4,9	16,0	9,9	4,2
Sensores de fibra óptica	0,3 – 1,7	-27,6	-120,9	-75,5	-34,7
	1,7 - 3,6	-27,8	-63,5	-57,5	-49,6
	3,6 - 5,6	0,4	-1,1	1,8	1,8
	5,6 - 7,6	2,1	5,4	10,7	11,1
	7,6 - 9,8	1,9	4,9	9,7	10,1
	9,8 - 12	-3,6	-6,8	1,3	2,3
	12 - 14	-1,1	0	1,4	9,3
	14 – 16,1	8,5	28,2	14,6	8,8

En primer lugar, cabe destacar el hecho de que los perfiles de tensión térmica generada entre fuste y terreno muestran una respuesta proporcional al calor inyectado en el pilote. Se observa que, al dilatar el pilote por efecto del calentamiento, la mitad superior tiende a subir, produciendo rozamientos negativos, máximos en el momento Cb (-12,8 kN/m² en extensómetros y -63,5 kN/m² en fibra óptica, entre 1,7 y 3,7 m). Tanto los resultados de los extensómetros como los de fibra óptica muestran que la resistencia a la dilatación se concentra fundamentalmente en los dos extremos del pilote: por un lado, en los metros más superficiales, hasta los 3,6 m, en los cuales el terreno está constituido por rellenos y por un nivel de arcillas firmes; y, por otro lado, en la zona inferior, entre los 14 y 16 metros, de terreno consistente, donde la tensión térmica transmitida por fuste es netamente positiva y aumenta proporcionalmente al calor inyectado en el pilote, mostrando su máximo valor durante el momento Cb. La influencia de la columna litológica es, pues, muy evidente en esta distribución.

La tendencia a la dilatación se invierte en los momentos Cc y Cd, que suponen un enfriamiento relativo del pilote con respecto a Cb. Los incrementos de valor positivo registrados desde la superficie hasta los 12 m de profundidad durante estos momentos Cc y Cd, aunque sólo suponen una recuperación parcial, indican una resistencia del terreno a la contracción del pilote. A partir de los 12 metros en fibra óptica, y 13,2

metros en extensómetros, correspondiendo a niveles litológicos de mayor resistencia que se oponían a la dilatación en la mitad inferior del pilote, se registran ahora incrementos de tensión transmitida al terreno de signo negativo, es decir, oponiéndose a la contracción por enfriamiento. Sin embargo, con respecto al origen, la tensión se mantiene todavía con signo positivo en esta zona.

En resumen, las tensiones tangenciales entre fuste y terreno generadas por la aplicación de calor durante el ensayo obedecen globalmente al esquema teórico representado en la Tabla VII-16, pero con matizaciones derivadas de dos peculiaridades: En primer lugar, debido a la litología local, las capas de terreno que se oponen a la dilatación del pilote durante su calentamiento y a su contracción durante el enfriamiento se concentran en los dos extremos del pilote: el nivel superficial de rellenos y arcillas firmes de los primeros 2 a 3 metros; y el nivel más resistente de gravas a partir de los 13-14 metros de profundidad. Por otro lado, en la fase de enfriamiento, la tendencia y los cambios de tensiones responden efectivamente al modelo representado, pero, coincidiendo con la inercia en la recuperación de tensiones ya comentada, los valores de las tensiones en los dos extremos del pilote no llegan a cambiar de signo, aunque la tendencia sea en ese sentido.

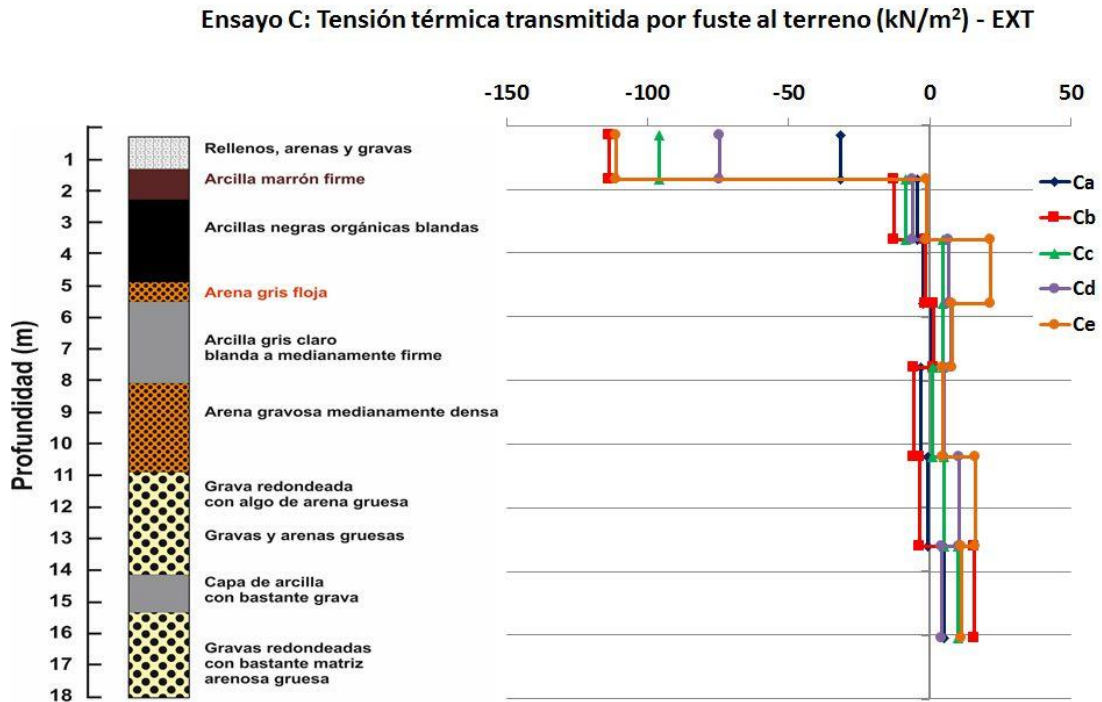


Figura VII-35: Tensión tangencial de origen térmico generada entre fuste y terreno durante el ensayo C (extensómetros)

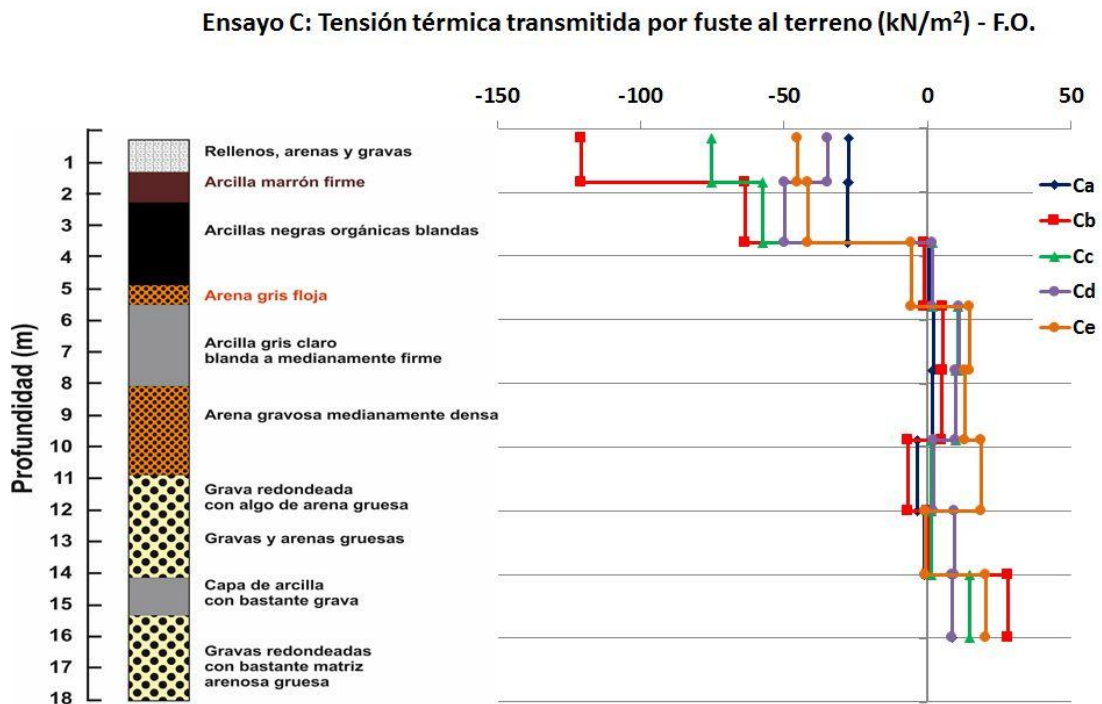


Figura VII-36. Tensión tangencial de origen térmico generada entre fuste y terreno durante el ensayo C (fibra óptica)

Resulta más completo el análisis de la tensión tangencial total entre fuste y terreno, considerando el efecto combinado de las diferentes fases de inyección de calor, más la carga mecánica constante de 1000 kN durante todo el ensayo. Los valores resultantes se reflejan en la Tabla VII-17, en la Figura VII-37 (extensómetros) y en la Figura VII-38 (fibra óptica).

Tabla VII-17. Tensiones totales tangenciales de origen térmico entre fuste y terreno durante el ensayo C (kN/m²)

**TRANSMISIÓN DE CARGAS AL TERRENO
CRITERIO DE SIGNOS**

	Intervalos de profundidad	Ca	Cb	Cc	Cd
	Extensómetros	0,3 – 1,7	-51,5	-133,7	-115,8
1,7 - 3,6		-1,5	-9,8	-5,6	-2,3
3,6 - 5,6		20	20,7	26,8	28,6
5,6 - 7,6		3,6	4,6	7,9	10,7
7,6 – 10,4		-14,8	-17,3	-10,7	-6,6
10,4 - 13,2		41,8	39	47,7	53,1
13,2 - 16,1		74,9	85,7	79,8	81,0
Sensores de fibra óptica	0,3 – 1,7	-36,7	-130,1	-85,2	-54,6
	1,7 - 3,6	-32,0	-67,3	-61,3	-45,9
	3,6 - 5,6	22,1	20,7	23,6	16,8
	5,6 - 7,6	-5,9	-2,9	2,5	6,4
	7,6 - 9,8	-5,4	-2,6	2,3	5,8
	9,8 - 12	-5,8	-7,1	1,3	18,5
	12 - 14	75,4	74,3	75,7	73,6
	14 – 16,1	74,5	93,9	80,6	86,4

Se observa que, al dilatar el pilote por efecto del calentamiento, la mitad superior tiende a subir, produciendo rozamientos negativos, máximos en el momento Cb (-33,7 kN/m² en extensómetros y -130,1 kN/m² en fibra óptica). A partir de los 12 metros, correspondiendo a niveles litológicos de mayor resistencia que se oponen a esta dilatación en la mitad inferior del pilote, se registran valores de tensión tangencial de signo positivo, es decir, de sentido ascendente.

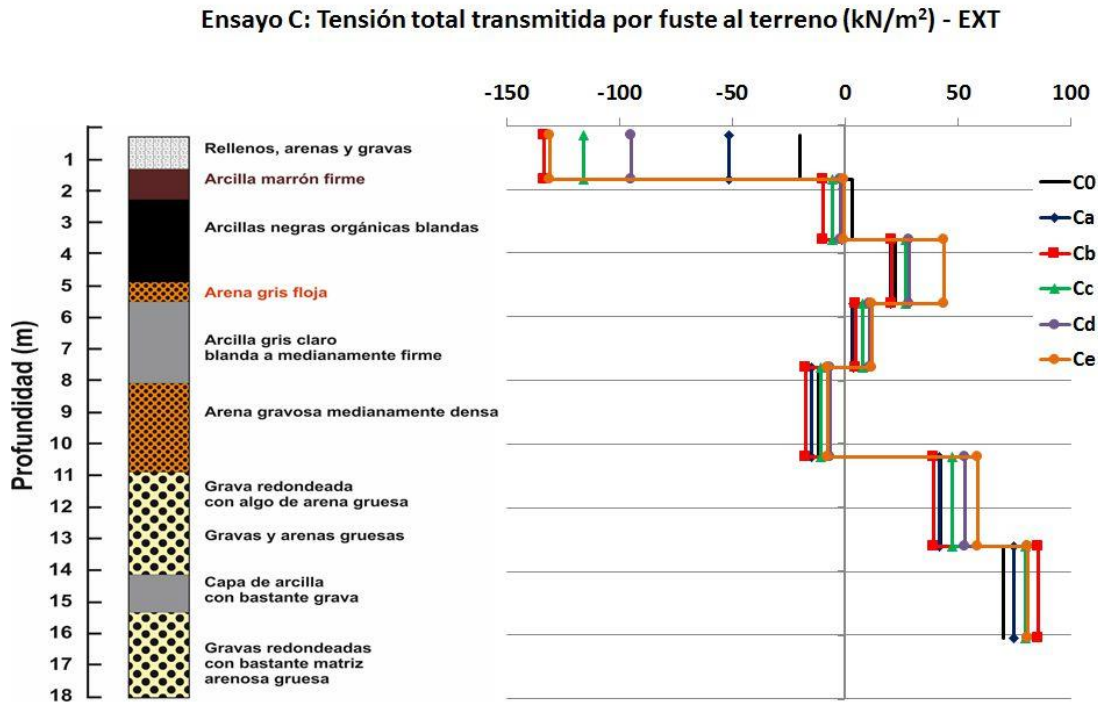


Figura VII-37: Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante el ensayo C (extensómetros)

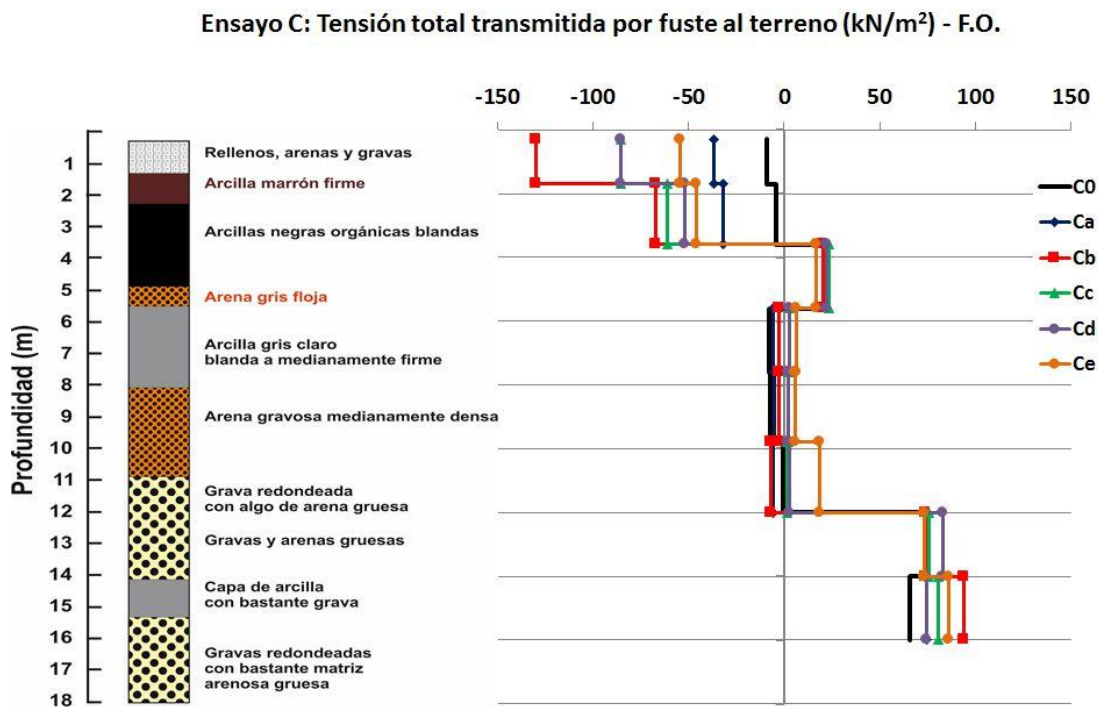


Figura VII-38. Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante el ensayo C (Fibra óptica)

El tipo de comportamiento observado en el pilote durante el ensayo C ya ha sido descrito en los dos estudios previos realizados en Lausanne, Suiza (Laloui et al., 2006; Laloui, 2011) y Cambridge, UK (Amis, 2008; Bourne-Webb et al., 2009; Ouyang et al., 2011). En los tres casos, se desarrolla una resistencia por fuste negativa en la parte superior del pilote y positiva en la parte inferior, como respuesta a la tendencia a dilatar del pilote con el calentamiento. Al igual que en el estudio de Cambridge, se detecta un aumento de la tensión tangencial transmitida por fuste con la profundidad.

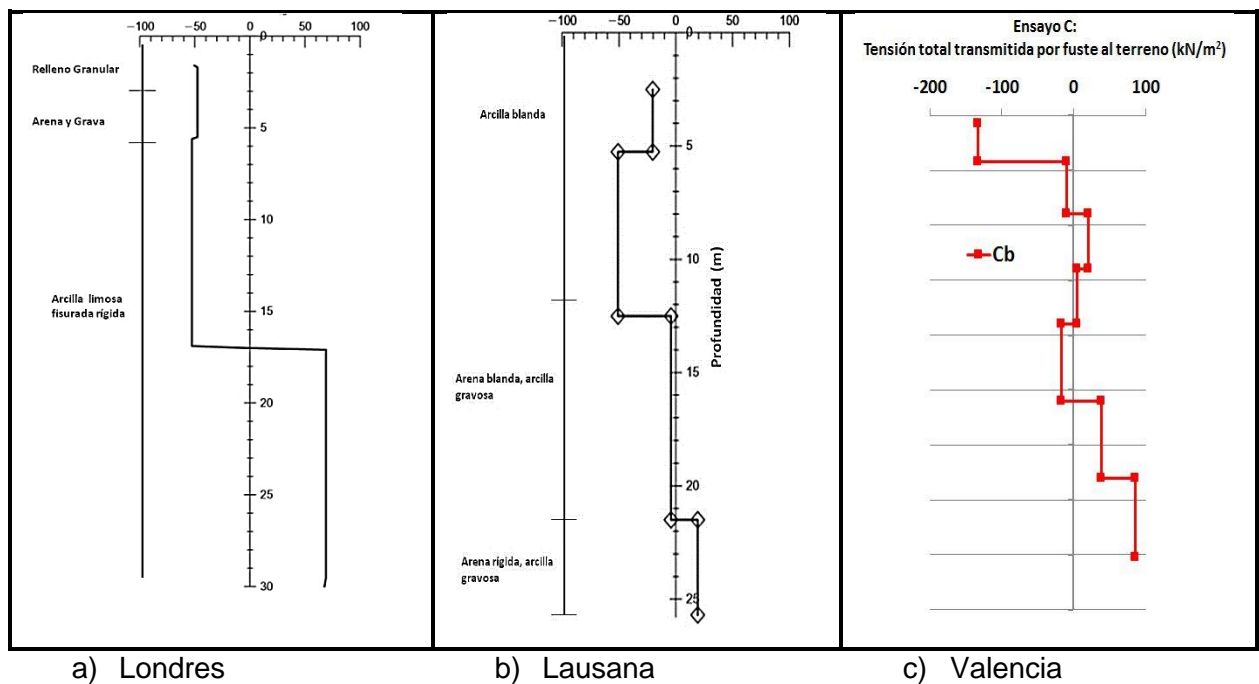


Figura VII-39: Tensión tangencial total entre fuste y terreno (kN/m²) durante los ciclos de calentamiento: a) Ensayo de Londres, $\Delta T=29,4$ °C; b) Ensayo de Lausana, $\Delta T=20,9$ °C (Amaya, y otros 2012); c) Ensayo C, momento Cb: $\Delta T=15$ °C

Las diferencias en los perfiles de tensión tangencial en los tres estudios derivan de las diferencias en las columnas litológicas en los tres locales, siendo el terreno más homogéneo en el caso de Londres, con una arcilla limosa fisurada rígida entre los 6 y los 30 metros de profundidad, y también en el de Lausana, con solo tres niveles de terreno diferenciado. En este último caso, al igual que en el pilote de Valencia, se observa una zona intermedia en el perfil de tensiones, correspondiente a un nivel de arcilla blandas/arcilla gravosa, entre los 12 y los 21 metros de profundidad, donde las variaciones de tensión son mínimas durante el calentamiento: es un nivel que no se

opone prácticamente a la dilatación del pilote. En el caso de Valencia, esa zona equivaldría a la situada entre las profundidades de 3 a 12 metros, aproximadamente.

Durante el ensayo de caracterización térmica del pilote (ensayo C) se le ha sometido a una secuencia de fases consistentes en la inyección de calor en términos de potencia calorífica controlada. De esta forma, se ha llegado a aplicar unos niveles de potencia térmica muy superiores a las que existirían en condiciones reales de explotación geotérmica, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del pilote en condiciones térmicas límite. Si bajo estas condiciones térmicas extremas el pilote funciona correctamente con un coeficiente de seguridad apropiado con respecto a su capacidad portante, su resistencia por punta y por fuste, se puede trabajar en condiciones geotérmicas reales sin riesgo estructural para el pilote y la estructura suprayacente.

Se analizan a continuación los valores de la carga transmitida al terreno por punta y por fuste, obtenidos a partir de las medidas de extensómetros y de fibra óptica en el momento C_b de máxima inyección de calor del ensayo C (Tabla VII-18). Con el fin de facilitar la comprensión de los valores analizados, se comparan también los valores resultantes del ensayo A y B, correspondientes a carga mecánica de 1000 kN en cabeza.

Tabla VII-18. Carga total transmitida al terreno por fuste y por punta en los ensayos A, B y C. Comparación con la capacidad portante del pilote, su resistencia por punta y por fuste (método CAPWAP)

CAPWAP	Resistencia por fuste (kN)	Resistencia por punta (kN)	Capacidad portante total del pilote (kN)
		711,3	1800
	Carga total transmitida por fuste (kN)	Carga transmitida por punta (kN)	Carga en cabeza (kN)
Ensayo A	412	588	1000
	58%	33%	40%
	C.S. = 1,7	C.S. = 3,1	C.S. = 2,5
Ensayo B (ext)	455	545	1000
	64%	30,3%	40%
	C.S. = 1,6	C.S. = 3,4	C.S. = 2,5
Ensayo B (F.O.)	395	605	1000
	55%	34%	40%
	C.S. = 1,8	C.S. = 3,0	C.S. = 2,5
Ensayo C (ext)	221	779	1000
	31%	43.3%	40%
	-	C.S. = 2,3	C.S. = 2,5
Ensayo C (F.O.)	72	928	1000
	10,1%	52%	40%
	-	C.S. = 1,9	C.S. = 2,5

Comparando estas cargas con las resistencias por punta deducidas del ensayo de la hinca, resulta que:

- La carga total, mecánica más térmica, transmitida al terreno por la punta del pilote en el punto de máxima potencia inyectada, C_b (120W/m), es de 779 kN medida por los extensómetros y 928 kN medida por los sensores de fibra óptica. Estos valores significan que el pilote, a máxima potencia inyectada, estaría trabajando al 43% de su resistencia por punta si se toman como referencia los extensómetros y de un 51,5% si se obtiene a partir de la fibra óptica. Esto equivale a unos coeficientes de seguridad de 2,3 en el caso de los extensómetros y de 1,9 si se obtiene a partir de la fibra.

- Considerando una carga en cabeza de 1000 kN, si se le resta la carga que actúa en la punta del pilote en el ensayo C, resulta que la carga total que se transmite al terreno a lo largo de todo el fuste sería bastante pequeña (220 kN según los extensómetros y 72 kN según la fibra óptica). Obviamente, esta integración de las tensiones transmitidas al terreno por fuste no está teniendo en cuenta la alteración de las tensiones en cada nivel del terreno que se está produciendo debido a los efectos térmicos, con variaciones de signo contrarias que hacen que al sumarse las cargas transmitidas se anulen y la resultante sea pequeña. Para analizar si se agota la resistencia por fuste del terreno en los diferentes niveles, en definitiva, para evaluar el margen de seguridad relativamente a la resistencia por fuste, se deben considerar, no las cargas axiales, sino las tensiones tangenciales en cada nivel litológico, y compararlas con la resistencia al corte correspondiente.
- En la Tabla VII-19 se compara la resistencia por fuste del pilote (en términos de tensión) en los diferentes tramos determinada a partir del ensayo CAPWAP, con las tensiones tangenciales generadas en el ensayo C, como resultado de la aplicación de cargas mecánicas y térmicas, en el momento C_b de máxima aplicación de potencia. Aunque la discretización por intervalos verticales entre sensores dificulta la comparación, se puede observar que, en general, las tensiones tangenciales alcanzan o sobrepasan los valores de la resistencia por fuste en todos los intervalos. Es decir, el margen de seguridad en lo que se refiere a la capacidad portante por fuste se puede considerar agotado.
- Las cargas de origen térmico inducidas en el ensayo C son, por lo tanto, considerables cuando se comparan con las cargas mecánicas. El coeficiente de seguridad de capacidad por punta bajo la acción de las cargas mecánicas y térmicas conjuntamente pasa de un valor de 3, con sólo cargas mecánicas, a un valor de 2, aproximadamente. Y por lo que respecta a la capacidad portante por fuste, cuyo coeficiente de seguridad solamente con la carga mecánica era del orden de 1,7, con la aplicación de la carga térmica puede considerarse que el margen de seguridad se ha agotado.

Es importante recordar que las potencias inyectadas en el ensayo C no son potencias de trabajo en una instalación geotérmica al uso.

Tabla VII-19. Resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensiones tangenciales entre fuste y terreno en el momento Cb del ensayo C.

	Tramo (m)	Resistencia media por fuste (kN/m ²) CAPWAP	Tensión tangencial térmica por fuste (kN/m ²) Cb	Tensión tangencial total por fuste (kN/m ²) Cb
Extensómetros	0,3-1,7	0	-113,8	-133,7
	1,7-3,6	2,47	-12,8	-9,8
	3,6-5,6	9,59	-1,4	20,7
	5,6-7,6	24,08	1,4	4,6
	7,6-10,4	18,03	-5,6	-17,3
	10,4-13,1	23,45	-3,6	39,0
	13,1-16,1	67,46	16,0	85,7
Fibra óptica	0,3-1,7	0	-121	-130,1
	1,7-3,6	2,47	-64	-67,3
	3,6-5,6	9,59	-1,1	20,7
	5,6-7,6	24,08	5,36	-2,9
	7,6-9,8	14,63	4,87	-2,6
	9,8-12,0	31,57	-6,8	-7,1
	12,0-14,0	12,01	0	74,3
	14,0-16,1	90,73	28,2	93,9

Capacidad del pilote (CAPWAP) y tensiones totales transmitidas por fuste al terreno en el momento Cb (kN/m²)

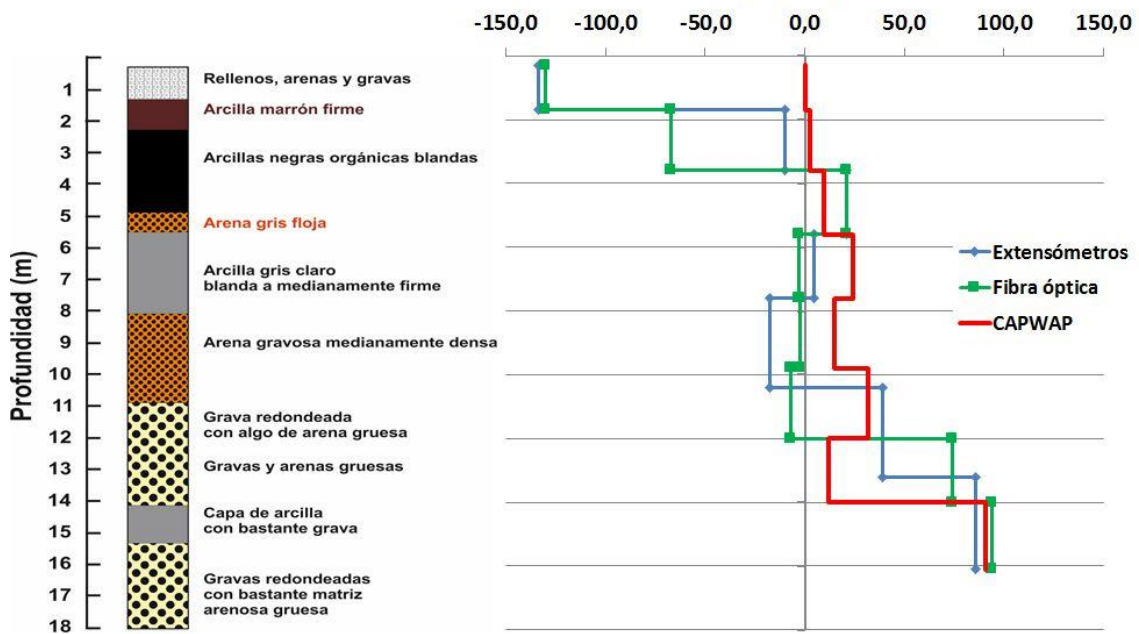


Figura VII-40. Comparación entre la resistencia por fuste del pilote (CAPWAP) y las tensiones tangenciales totales entre fuste y terreno durante el momento Cb del ensayo C.

VII.4 PRUEBA DE SIMULACIÓN DE CARGAS DIARIAS: ENSAYO E

Se realizó una prueba de simulación de cargas diarias (ensayo E) entre los días 22/10/2013 y el 4/11/2013, simulando las condiciones de funcionamiento de una oficina, durante 15 días consecutivos en modo refrigeración (verano). Para facilitar el análisis del ensayo E se identificaron una serie de puntos característicos por ciclo, indicados en la Tabla VII-20. Estos datos se repiten en cada uno de los 15 ciclos térmicos aplicados.

Tabla VII-20. Secuencia térmica de un ciclo diario del ensayo E

<i>Punto del ciclo</i>	<i>Hora</i>	<i>Salto térmico</i>	<i>Potencia inyectada (W)</i>	<i>Razón de potencia (W/m)</i>
E0	Antes de comenzar	0	0	0
Ea	11:00	3 °C	1400	80
Eb	14:00	1,5 °C	700	40
Ec	16:00	0	0	0
Ed	19:00	2 °C	875	50
Ee	21:00	1 °C	525	30
Ef	24:00	0	0	0
Eg	3:00	0	0	0
Eh	6:00	0	0	0

Dada la gran cantidad de datos registrados durante el ensayo E, su análisis se articula en dos fases: se aborda en primer lugar el estudio en detalle del comportamiento del pilote a lo largo de un ciclo completo del ensayo: el ciclo 2. Posteriormente se analizan los 15 ciclos del ensayo E completo.

VII.4.1 ANALISIS DEL CICLO 2

El ciclo 2, de 24 horas de duración, comienza el día 23 de octubre de 2013 a las 7:00 de la mañana y finaliza a las 7:00 del día siguiente. En la Figura VII-41 se pueden observar las fases térmicas del ciclo y los puntos de estudio elegidos. Con el fin de facilitar la interpretación de la figura, se han incorporado los dos últimos puntos del ciclo anterior (ciclo 1).

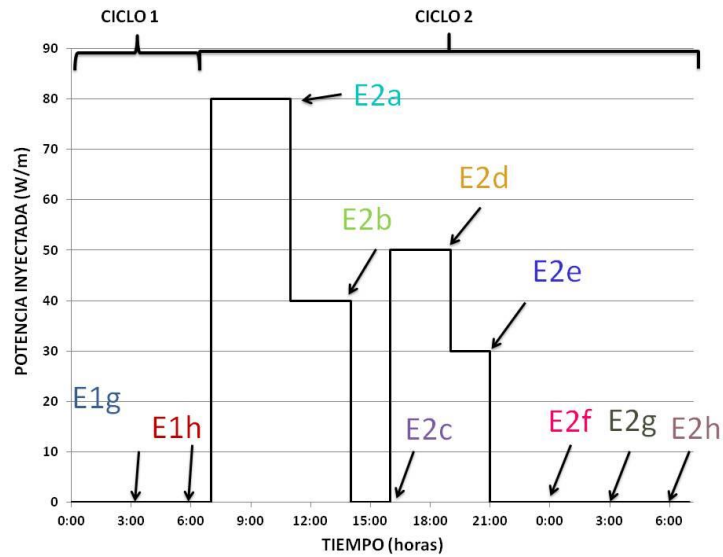


Figura VII-41. Detalle de los puntos estudiados del ciclo 2

VII.4.1.1 Temperaturas medidas en el interior del pilote

En la Figura VII-42 se muestra el incremento de temperatura a lo largo del ciclo 2, tomando como origen de temperaturas el momento anterior al comienzo del día 2 del ciclo E.

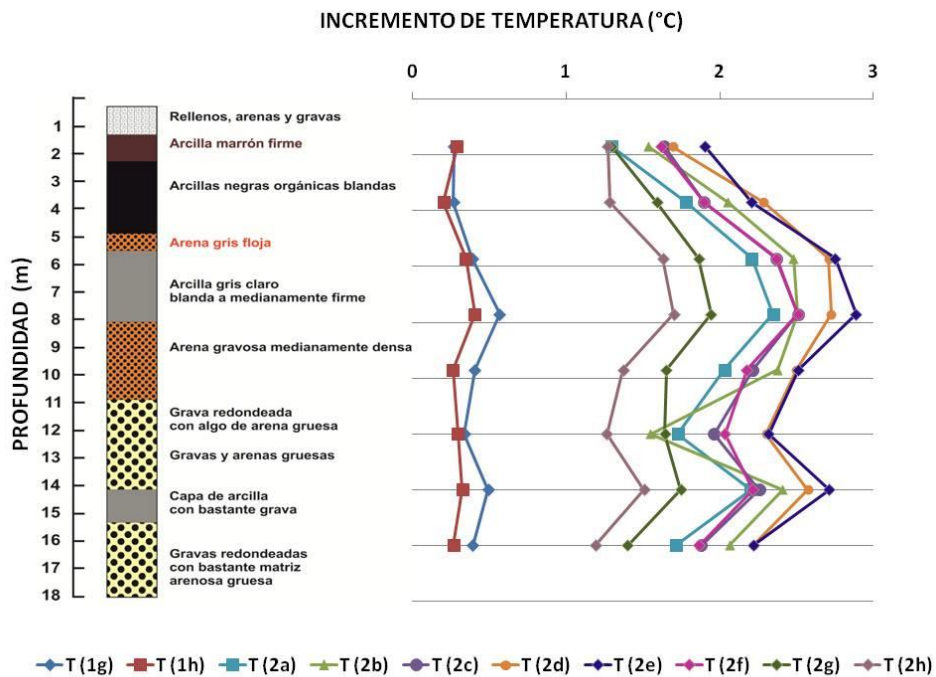
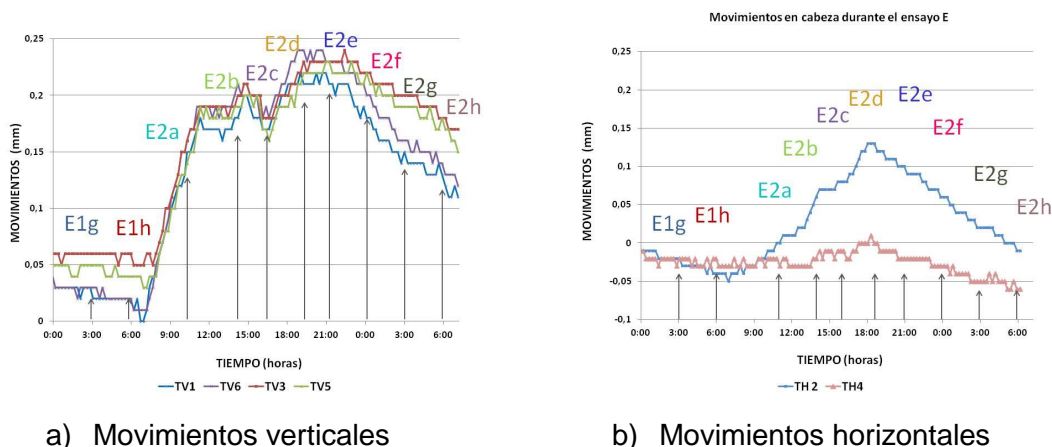


Figura VII-42. Incremento de la temperatura con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E

Se observa que el incremento de temperatura en cada momento del ciclo es función de la potencia térmica inyectada, correspondiendo los valores máximos a los momentos E2d (19:00 h) y E2e (21:00 h) del día. En cuanto a la variación de la temperatura con la profundidad, se distinguen dos tendencias generales en todas las curvas: en los 8 metros superiores, en los que el pilote se encuentra rodeado por materiales arcillosos, se observa un incremento de la temperatura con la profundidad. A partir de los 8 metros, el terreno que rodea al pilote está compuesto por gravas y arenas. En este tramo, la temperatura del pilote tiende a disminuir con la profundidad, con la salvedad del tramo comprendido entre 14 y 15 m de profundidad, donde se encuentra un nivel aislado de materiales arcillosos. Coincidiendo con este nivel geológico, y tal vez debido a su presencia, la temperatura aumenta puntualmente en el interior del pilote.

VII.4.1.2 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Al simular el funcionamiento del sistema en modo refrigeración (verano), la bomba inyecta calor en el interior del pilote en una secuencia cíclica descrita al inicio de este apartado. Los diferentes escalones de potencia inyectada inducen movimientos horizontales y verticales en la cabeza del pilote, como se detallan en este apartado (Figura VII-43).



a) Movimientos verticales

b) Movimientos horizontales

Figura VII-43. Movimientos detectados en la cabeza del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E

Se observa en la figura que, al inyectar calor en el pilote, éste tiende a dilatar, llegando a medirse movimientos verticales ascendentes de la cabeza de hasta **0,23 - 0,24 mm**. Estos valores máximos no corresponden al momento de máxima potencia inyectada (E2a) sino a los momentos E2d (19:00) y E2e (21:00), correspondientes a momentos de final de inyección de 50 y 40 W/m, respectivamente. Este comportamiento es coherente con la evolución de incrementos de temperatura y refleja una inercia térmica del sistema que favorece la acumulación de calor a lo largo del día. Así, se produce un desfase entre las potencias térmicas de funcionamiento de la bomba y el máximo movimiento registrado, que coincide con el fin del ciclo diario de inyección de calor. Comparando este movimiento máximo con el medido durante el ensayo C (1,23 mm), se observa que es mucho menor, debido a que también es menor la potencia térmica inyectada.

En el punto E2h, una vez finalizado el ciclo 2, el pilote no ha recuperado el estado inicial, registrándose unos movimientos verticales de entre **0,12 y 0,17 mm**. Estos valores indican que el pilote no se ha recuperado totalmente de la dilatación producida en este ciclo, al no haberse tampoco recuperado las temperaturas iniciales.

Se observa que los movimientos horizontales también responden claramente a los escalones de carga térmica. El movimiento horizontal máximo medido en el eje x es de 0,13 mm, y en el eje y, de -0,06 mm.

VII.4.1.3 Deformaciones medidas en el interior del pilote

Los valores de deformación observada registrados por los extensómetros (Figura VII-44) permiten distinguir dos zonas de comportamiento deformacional diferente conforme referido. Los 10 primeros metros de terreno, compuesto por materiales arcillosos blandos que ofrecen poca resistencia a la dilatación del pilote. Por el contrario, a partir de los 10 m de profundidad, el pilote se encuentra rodeado por gravas y arenas de mayor resistencia que reducen la capacidad de deformación del pilote a valores inferiores y más homogéneos con la profundidad. Las máximas deformaciones de tracción registradas, **20 $\mu\text{m/m}$** , se producen en el escalón E2a (11:00h, tras la máxima potencia inyectada, de 80W/m) y E2d (19:00h, tras una potencia inyectada intermedia, 50 W/m) a una profundidad de 6 metros, coincidiendo con un nivel de arcillas grises blandas de baja resistencia. Las deformaciones en el

momento E2h, inmediatamente después de la finalización del ensayo, indican que el pilote no se ha recuperado totalmente de la dilatación térmica.

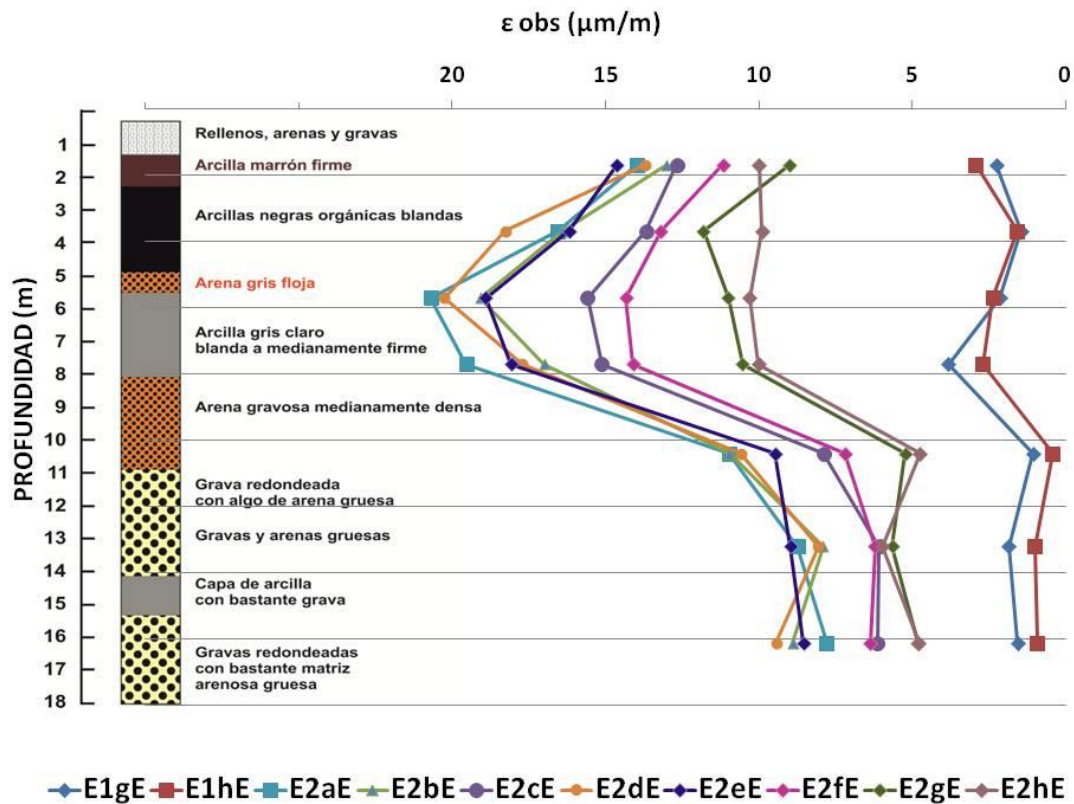


Figura VII-44. Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

Paralelamente, integrando las deformaciones verticales a lo largo del pilote, se ha determinado el acortamiento del pilote a lo largo del ciclo 2 del ensayo E. En la Figura VII-45 se muestra la evolución con el tiempo del movimiento vertical promedio en cabeza del pilote a partir de las medidas de los 4 LVDT's, junto con el acortamiento vertical obtenido a partir de los valores registrados por los sensores en el interior del pilote.

Se observa un alargamiento máximo de **0,23 mm** experimentado por el pilote en el momento E2a (11:00h), bajo la carga de 1000 kN y tras la aplicación de 80 W/m de potencia térmica. Este valor se repite en el momento E2d (19:00h, tras una potencia inyectada intermedia, 50 W/m), casi al final del ciclo diario de inyección, lo que demuestra la importancia de la inercia térmica en los movimientos y deformaciones del pilote, que muestran siempre este desfase debido a acumulación de calor a lo largo del día.

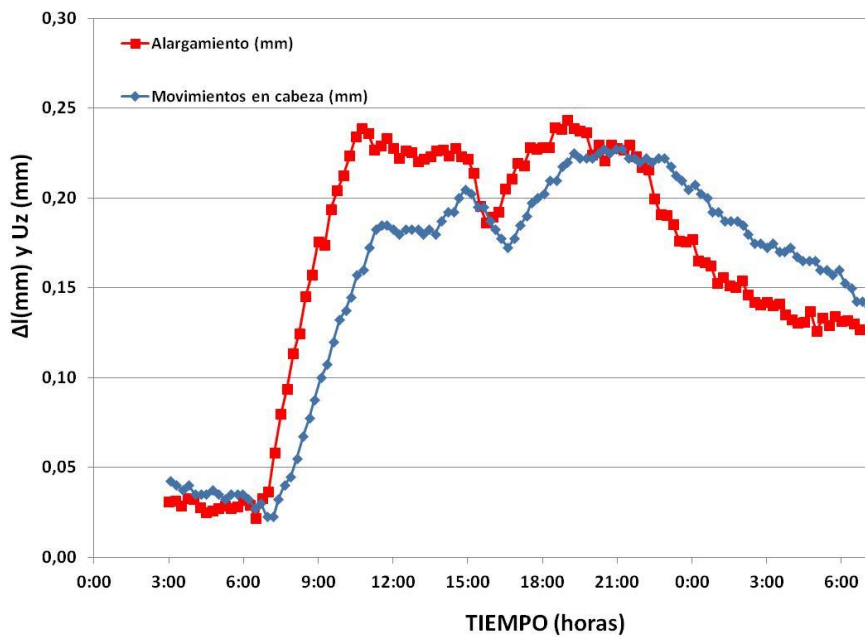


Figura VII-45. Movimientos en cabeza (LVDT's) y deformación vertical del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E.

El máximo movimiento vertical promedio, calculado a partir de las medidas de los LVDT en la cabeza del pilote, fue de **0,22 mm** en el momento E2d (19:00h, tras una potencia inyectada intermedia, 50 W/m), mientras que en el momento E2a (11:00h) sólo era de 0,18 mm. A partir del máximo valor de movimiento en cabeza y del máximo valor de dilatación del pilote, ambos correspondientes al momento E2d, puede deducirse el asentamiento experimentado por la punta del pilote, que ha sido de 0,05 mm, aproximadamente. Se muestran estos datos en la Tabla VII-21 junto con los correspondientes a los ensayos anteriores.

Tabla VII-21. Comparación movimientos en cabeza, acortamiento del pilote y asiento de la punta obtenidos durante los ensayos A, B, C y E

	A (ciclo 3) 3CC-1000kN	B (ciclo 3) 3CC-1000kN	C Cb	E (ciclo 2) E2a
Movimiento vertical en cabeza, mm	-7,2	-5,3	+1,23	+0,18
Acortamiento/dilatación del pilote, mm	-4,1	-4,1	+1,6	+0,23
Asiento de la punta, mm	-3,1	-1,2	-0,37	-0,05

VII.4.1.4 Tensiones en el interior del pilote

Las diferentes potencias térmicas inyectadas al pilote, inducen en éste una tendencia a la dilatación. Debido a las constricciones impuestas por fuste, punta y cabeza, no es posible desarrollar toda la deformación térmica teórica libre. Esta deformación no desarrollada genera tensiones internas de origen térmico, detectada mediante ambos tipos de instrumentación: extensómetros (Figura VII-46) y fibra óptica (Figura VII-47).

En primer lugar, cabe destacar que ambas figuras muestran una misma tendencia de incremento de las tensiones internas de origen térmico con la profundidad, aunque los extensómetros registran un incremento de tensión de origen térmico menor que los sensores de fibra óptica. En segundo lugar, se observa una tendencia, más evidente en los sensores de fibra óptica que en los extensómetros, a incremento de tensión térmica en la superficie de 0, donde no hay restricción a la dilatación y sólo actúa la carga mecánica aplicada en cabeza de 1000 kN.

En el primer escalón de inyección de potencia (E2a), de 80 W/m, el pilote sufre un incremento de tensión de compresión media de alrededor de 625 kN/m² (Figura VII-47), medido con los sensores de fibra óptica, aunque este valor disminuye hasta aproximadamente 450 kN/m² (Figura VII-46) medido con los extensómetros. El máximo incremento de tensión térmica (**-625 kN/m²** en extensómetros y **-900 kN/m²** en fibra óptica) corresponde en las dos figuras al momento E2e (21:00h, tras una potencia inyectada baja, 30 W/m), a una profundidad de 13-14 metros. Una vez más, los valores máximos de tensiones no corresponden a los momentos de máxima inyección de calor, sino a los momentos E2d y E2e, al final del ciclo diario geotérmico, lo que describe una importante acumulación de calor e inercia térmica y el necesario desfase temporal entre potencias térmicas y respuesta tenso-deformacional del pilote.

Una vez finalizado el ciclo 2 del ensayo E (E2g y E2h) la tensión de origen térmico tiende a disminuir sin disiparse del todo.

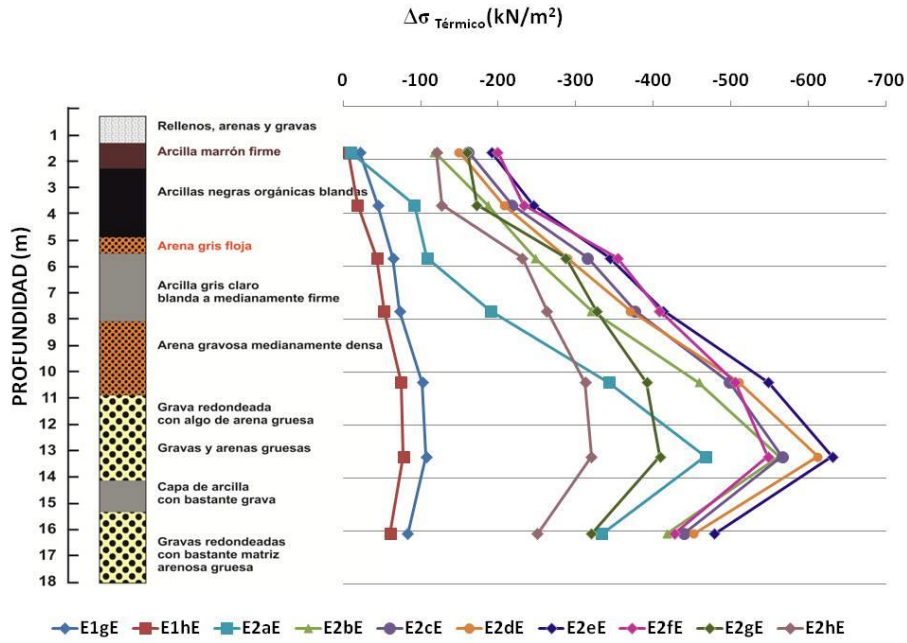


Figura VII-46. Evolución del perfil de tensiones térmicas en el interior del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E (Extensómetros)

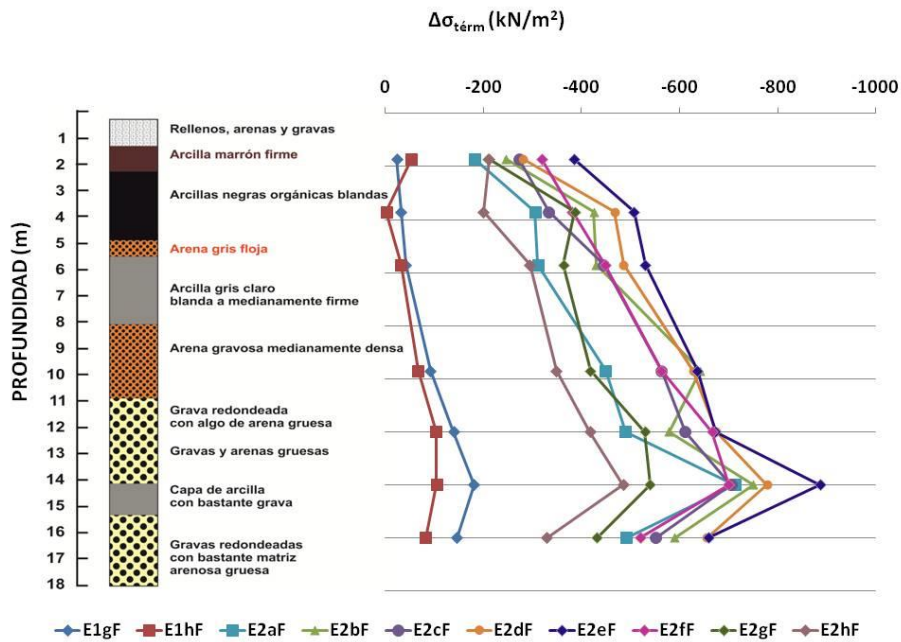


Figura VII-47. Evolución del perfil de tensiones térmicas en el interior del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E (Fibra óptica)

VII.4.1.5 Carga total en el interior del pilote

Durante el ciclo 2 del ensayo E, la máxima carga axil de compresión de origen térmico registrada en el interior del pilote es de **110 kN** en el caso de la fibra y de **80 kN** en el caso de los extensómetros, que sumada a la distribución de carga debida a los 1000 kN situados en la cabeza del pilote, dan como resultado una carga total (térmica más mecánica), muy similar a la carga puramente mecánica de partida. Es decir, el efecto de la potencia térmica aplicada sobre la carga axil en el pilote es relativamente pequeño.

La evolución de los perfiles de carga total (térmica más mecánica) a lo largo del ensayo E obtenidas a partir de los datos de extensómetros (Figura VII-48) y de sensores de fibra óptica (Figura VII-49) son muy similares. Se distinguen dos zonas de comportamiento claramente diferenciado. Las curvas medidas tienden a converger en cabeza de pilote a 1000 kN, la fuerza aplicada por el gato hidráulico. En los primeros 10-12 metros presentan valores de carga total relativamente constantes y homogéneos con la profundidad. En esta zona, el terreno no absorbe el incremento de carga, sino que lo transmite a la zona inferior del pilote. Por el contrario, a partir de 12 m se observa una clara tendencia a disminuir la carga axil con la profundidad. A los 12 m se registra el valor máximo del esfuerzo axil, de aproximadamente 1100 kN. En la punta del pilote se registran 600 kN.

Comparando el comportamiento del pilote durante el ensayo E con el observado y descrito durante el ensayo C llama la atención la mayor homogeneidad en la distribución de cargas en el ensayo E. Por el contrario, en el ensayo C, las diferencias de distribución de carga con la profundidad eran más acusadas, debido al efecto de la potencia inyectada en el interior del pilote, muy superior a la del ensayo E.

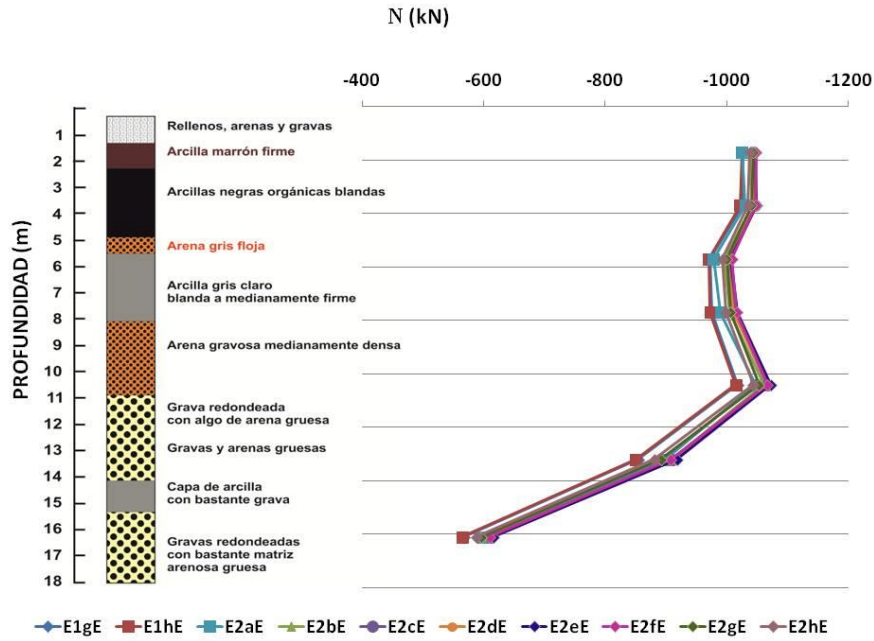


Figura VII-48. Evolución de los perfiles de carga total durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

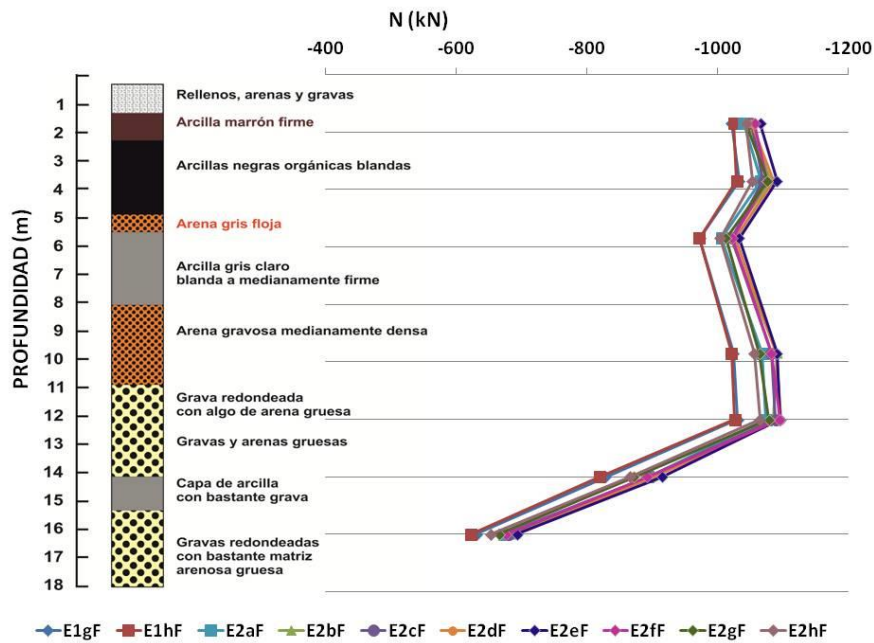


Figura VII-49. Evolución de los perfiles de carga total durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

VII.4.1.6 Carga en la punta del pilote

El cálculo de la carga que se transmite a la punta del pilote se ha realizado por duplicado: en primer lugar, considerando únicamente las cargas de origen térmico, y en segundo lugar, las cargas totales, resultado de sumar las cargas mecánicas y térmicas.

Carga térmica en la punta del pilote

En la Figura VII-50 se observa la evolución de carga térmica en la punta del pilote a lo largo del ciclo 2 del ensayo E, a partir de los datos obtenidos de los extensómetros y sensores de fibra óptica instalados a mayor profundidad. La máxima carga axial que le llega a la punta del pilote es de **60 kN**, medida con los extensómetros, y de **90 kN**, medida con la fibra óptica. La máxima carga se produce, con ambas instrumentaciones, en el momento E2e (21:00 tras una potencia inyectada baja, 30 W/m), cuando el pilote ha acumulado la mayor parte de calor debido a las inyecciones térmicas que se han producido a lo largo de todo el día. Una vez acabado el ciclo 2 la tendencia de los sensores es a recuperar el estado inicial de tensiones, pero sin llegar a completarse esa recuperación.

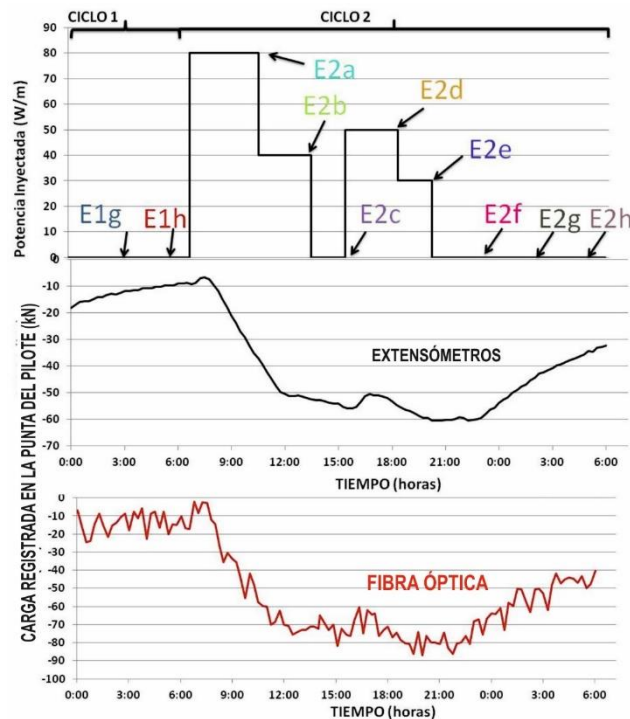


Figura VII-50: Evolución de la carga térmica en la punta del pilote a lo largo del ciclo 2 del ensayo E

Carga total en la punta del pilote

En la Figura VII-51 se muestra la evolución de la carga total (mecánica + térmica) en la punta del pilote a lo largo del ensayo E, obtenida a partir de los datos de extensómetros y sensores de fibra óptica instalados a mayor profundidad. La máxima carga axil que se produce es de **700 kN** medida con la fibra y de **615 kN** medida con los extensómetros, en el momento E2e (21:00 tras una potencia inyectada baja, 30 W/m).

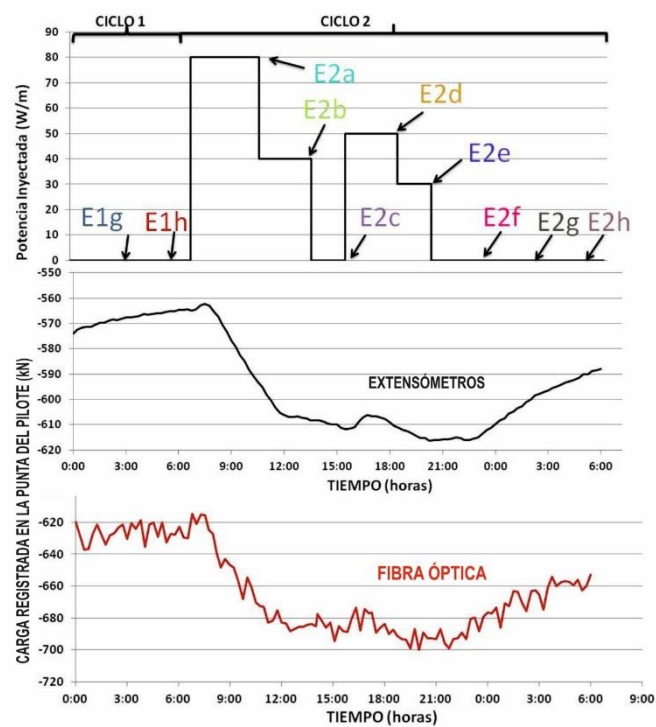


Figura VII-51: Evolución de la carga total en la punta del pilote a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

En resumen, la carga total medida en la punta del pilote, es de 700 kN a partir de los sensores de fibra óptica, de los cuales 90 kN son de origen térmico, siendo los restantes 610 kN son debidos a la carga mecánica. Los extensómetros miden una carga total en punta de 615 kN, de los cuales 60 kN son de origen térmico y 555 kN debidos a la carga mecánica. Estos valores indican que el pilote está trabajando a un 34-39% de su resistencia por punta, ofreciendo un coeficiente de seguridad por punta de 2,6–2,9, claramente superior al del ensayo C (1,9-2,3); y próximo al de los ensayos A y B, en la situación de pilote solicitado solamente mecánicamente (3,1).

VII.4.1.7 Carga transmitida al terreno por fuste

Como en el ensayo C, la inyección de calor provoca la dilatación del pilote. El terreno, por el contrario, tiende por rozamiento a constreñir esta dilatación. Esto genera tensiones de origen térmico en el interior del pilote que, unidas a las debidas a la carga mecánica aplicada, se transfieren al terreno por fuste o por punta.

En la Figura VII-1 y en la Figura VII-1 se representan los perfiles de tensión tangencial total fuste-terreno a lo largo del ciclo 2 del ensayo E. Puede observarse que la influencia de las cargas térmicas es muy pequeña, siendo estos perfiles muy parecidos al correspondiente al pilote cargado exclusivamente mecánicamente (perfil E0).

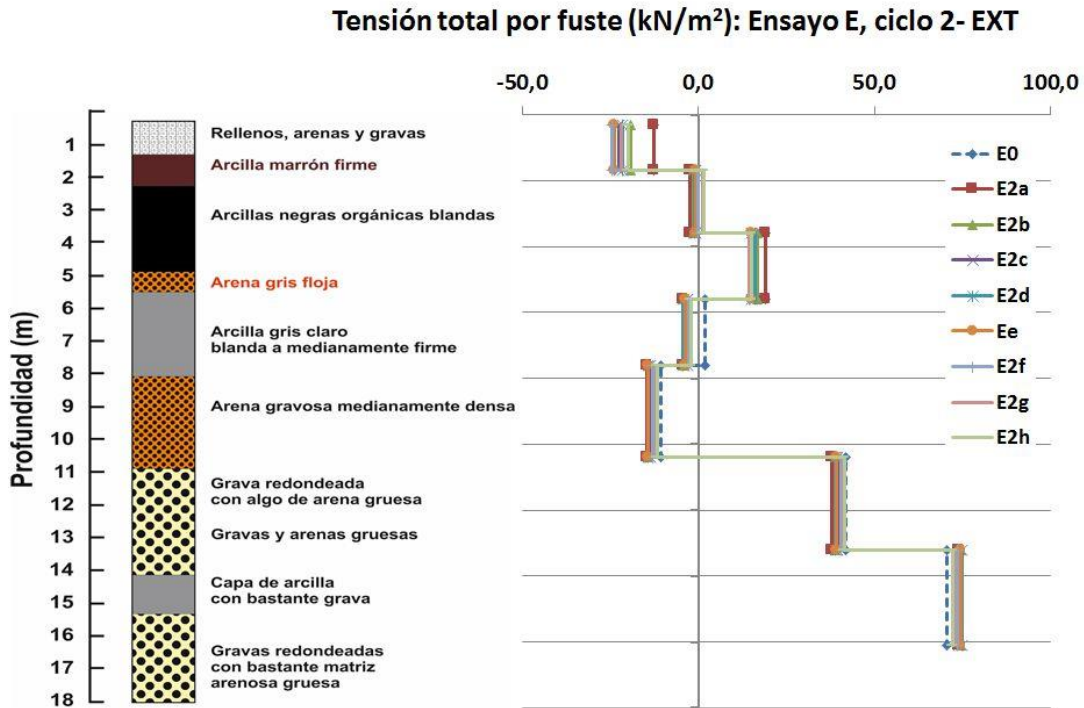


Figura VII-52. Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)

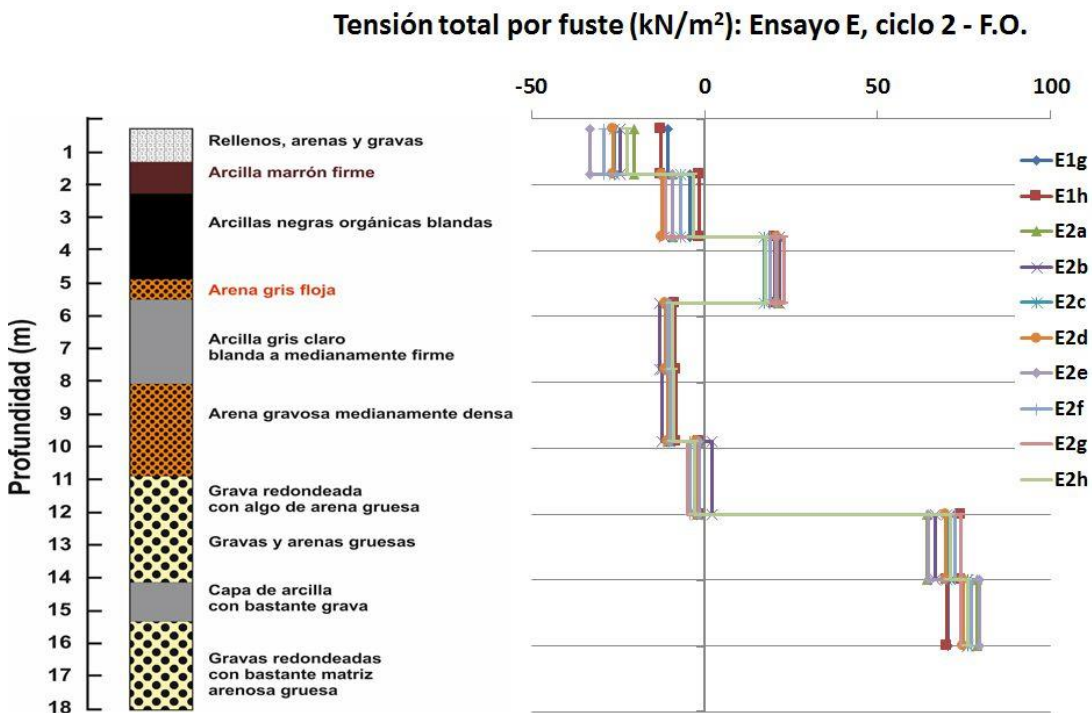


Figura VII-53. Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)

VII.4.2 ANALISIS DEL ENSAYO E COMPLETO

En la Figura VII-54 se representa la secuencia de ciclos de aplicación de potencia térmica del ensayo E. Se repitieron los ciclos durante 14 días consecutivos excepto los domingos.

Todos los ciclos, excepto el primero, comienzan a las 7 de la mañana y duran 24 horas. El primer día (ciclo 1) es el único incompleto, contando solo con los puntos “d” y “h” (ver Tabla VII-20).

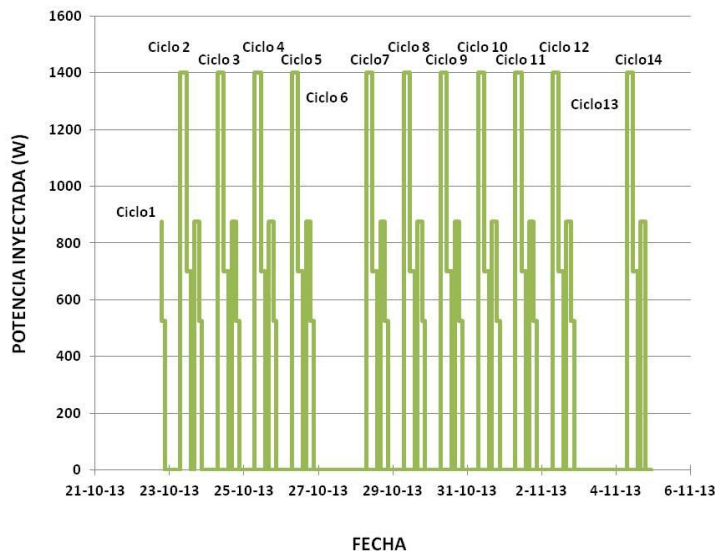


Figura VII-54. Ensayo E completo

VII.4.2.1 Temperaturas medidas en el interior del pilote

En la Figura VII-55 se muestra la evolución de la temperatura con la profundidad en el punto Ed, de máxima temperatura, del ensayo E, desde el segundo ciclo hasta el ciclo 14, en términos de incremento de temperatura con respecto al momento E0.

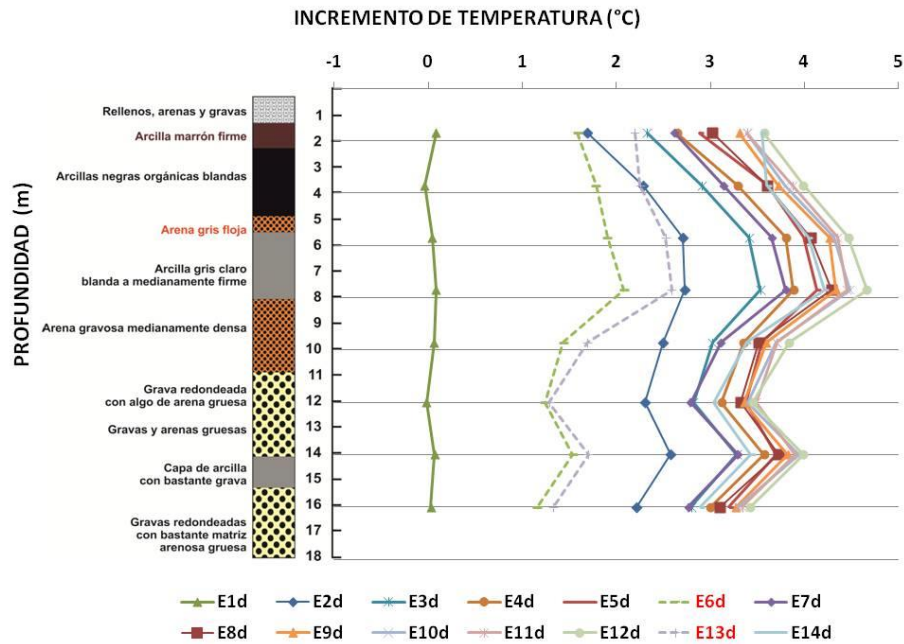


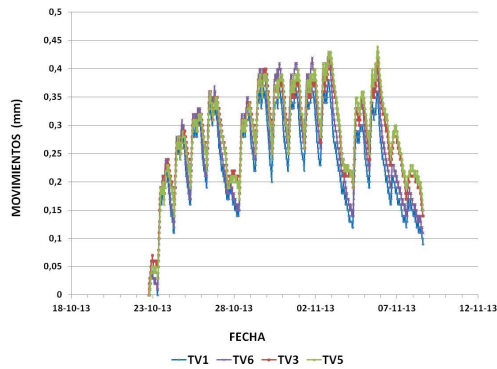
Figura VII-55. Incremento de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E, punto Ed

Los ciclos 6 y 13 (en rojo y línea discontinua) corresponden a los domingos, y son, por tanto, ciclos “planos”, esto es, sin potencia inyectada.

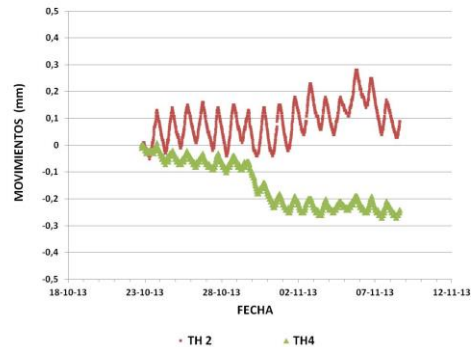
Se observa que la temperatura en el interior del pilote se incrementa a medida que aumenta el número ciclos del ensayo, especialmente los primeros 3 o 4 ciclos; posteriormente este aumento se atenúa considerablemente. Los domingos, ciclos sin inyección de calor, el pilote se recupera parcialmente y retoma su calentamiento a lo largo de los ciclos posteriores. El mayor aumento de temperatura dentro de cada ciclo se verifica en los puntos d y e, que no corresponden a los momentos de mayor potencia inyectada, sino al final del periodo de funcionamiento del sistema, al final del horario laboral. El máximo valor de incremento de temperatura que se produce en el punto d, es de 4,7 °C (ciclo 12) respecto al estado inicial E0.

VII.4.2.2 Movimientos medidos en la cabeza del pilote

Los diferentes escalones de potencia inyectada inducen movimientos horizontales y verticales en la cabeza del pilote, como se muestra en la Figura VII-56.



a) Movimientos verticales



b) Movimientos horizontales

Figura VII-56. Movimientos durante el ensayo E

Al calentarse el pilote tiende a dilatar. Se distingue la oscilación cíclica de los movimientos verticales debido a los sucesivos ciclos diarios, con máximos oscilando entre 0,35 y 0,44 mm. Se identifican fácilmente los domingos, durante los cuales no se inyecta calor en el sistema, por la disminución del movimiento vertical hasta valores en torno a 0,15 mm. El máximo movimiento vertical es de **0,45 mm**, en el ciclo 14. Estos datos son consecuentes con la variación de temperatura reflejada en la Figura VII-55. La secuencia de movimientos es muy similar a lo largo de todos los días del ensayo; incrementándose al principio, con valores constante en los días centrales del ensayo, aumentando ligeramente al final para finalizar disminuyendo el movimiento como consecuencia del fin del ensayo. Si se compara este movimiento con el medido en el ensayo C, se observa que las amplitudes son mucho menores, dado que la potencia térmica inyectada es muy inferior en el ensayo E.

Se observa que los movimientos horizontales también responden claramente a los escalones de carga térmica, y más exactamente a las oscilaciones térmicas debido a la actividad diurna y enfriamiento nocturno de la instalación. El movimiento horizontal máximo según el eje x es de +0,2 mm y en el eje y de -0,23 mm. La resultante es 0,3 mm hacia el sur.

VII.4.2.3 Deformaciones medidas en el interior del pilote

Durante este ensayo ha sido posible medir y registrar las deformaciones del pilote a través de los sensores de fibra óptica y de los extensómetros (Figura VII-57).

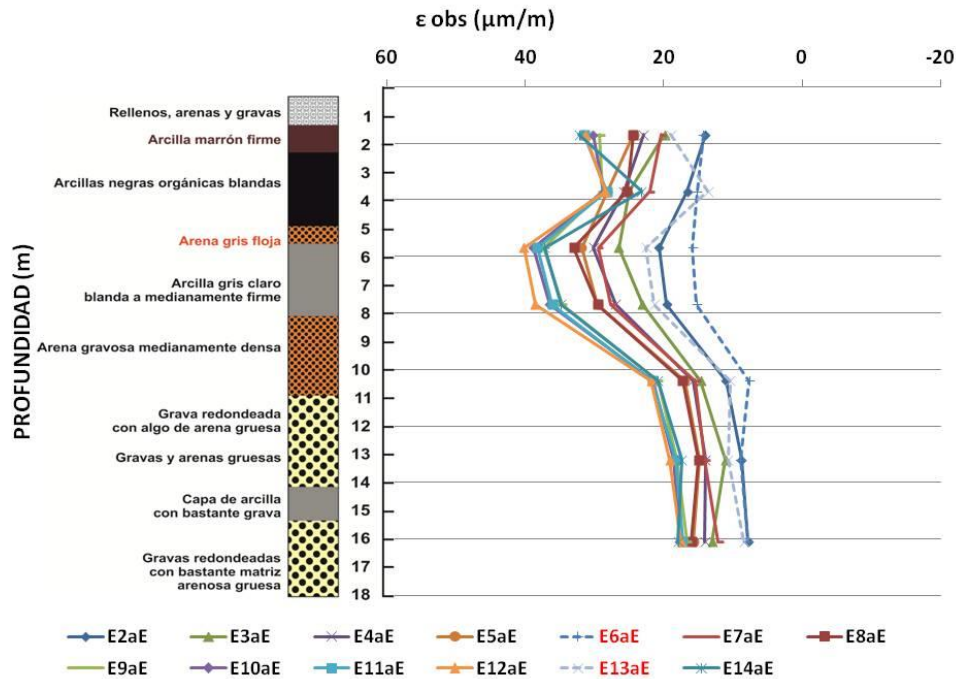


Figura VII-57. Evolución de la deformación observada en el interior del pilote durante el ensayo E (Extensómetros)

Las máximas deformaciones de tracción registradas en todos los ciclos del ensayo E, se producen en el escalón Ea (11:00 h, tras la máxima potencia inyectada 80W/m) y Ed (19:00 h, tras una potencia inyectada intermedia, 50 W/m) a una profundidad de 6 metros, en zona de terreno blando. Por otro lado, las deformaciones registradas el último momento del ensayo, Eh (06:00 h, justo antes de empezar a funcionar el sistema a las 07:00h) demuestran que el pilote no ha tenido tiempo de recuperarse totalmente entre un ciclo y otro.

En cuanto a la evolución de las deformaciones a lo largo del ensayo E, se observa que las deformaciones observadas en el pilote van aumentando a lo largo de los 15 ciclos, al igual que sucede con las temperaturas. La máxima deformación de tracción, **40 μm/m**, observada se produce en el punto Ea del ciclo 12, no del 14. Esto es debido a que el ciclo 13 corresponde a un domingo y no se inyecta calor en el pilote, permitiéndole recuperarse parcialmente. Tras esta recuperación parcial del pilote, los

lunes muestra deformaciones inferiores a los posteriores días de la semana, durante los cuales se acumula calor y deformación.

Finalmente, integrando las deformaciones verticales a lo largo del pilote, se ha determinado el acortamiento del pilote a lo largo del ensayo E. Se han tomado como puntos de referencia los momentos Ee (21:00 h, tras una potencia inyectada de 30W/m) y Ef (24:00 h, sin inyección de calor). En las siguientes figuras se muestra la evolución con el tiempo del movimiento vertical promedio en cabeza del pilote a partir de las medidas de los 4 LVDT's, junto con el acortamiento vertical obtenido a partir de los valores registrados por los sensores en el interior del pilote. Se observa la misma tendencia en ambos: los domingos se registra una bajada significativa de los dos parámetros comparados, debido a la no inyección de calor en el pilote. A partir del lunes, a lo largo de los días laborables de la semana hasta el sábado, se observa una sutil subida continua de ambos valores, tanto los movimientos en cabeza como las variaciones de longitud. Esta observación es coherente con el hecho descrito anteriormente de que en el último momento de cada ciclo, antes del comienzo del ciclo siguiente (Eh), el pilote no se ha recuperado térmicamente ni volumétricamente.

Durante el momento Ee de los 15 ciclos (Figura VII-58), bajo la acción de la carga mecánica de 1000 kN y tras un periodo de inyección de 30 W/m de potencia térmica. Se optó por estudiar este punto porque ha demostrado ser el momento diario de máximo alargamiento del pilote. El máximo valor registrado de movimiento en cabeza es de aproximadamente **0,38 mm**, muy parecido al alargamiento. De estos valores se deduce que el asentamiento experimentado por la punta del pilote ha sido prácticamente nulo.

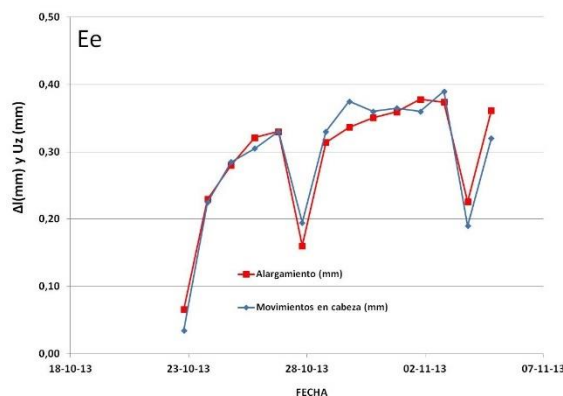


Figura VII-58. Movimiento en cabeza y deformación vertical del pilote durante el momento Ee del ensayo E.

Se recogen en la Tabla VII-22 los valores máximos de movimientos en cabeza y dilatación del pilote medidos en el ensayo, concretamente en el momento E12e. Se recogen para comparación los resultados del ensayo C y del ciclo 2 del este ensayo E.

Tabla VII-22. Máximos valores de movimiento en cabeza y dilatación del pilote durante el ensayo E. Comparación con el ensayo C

	C	E	E
	Cb	ciclo 2	ciclo 12
		E2a	E12e
Máximo valor de movimientos en cabeza (mm)	+1,23	+0,18	+0,39
Máximo valor de dilatación del pilote (mm)	+1,6	+0,23	+0,38
Asiento de la punta (mm)	-0,37	-0,05	+0,01

VII.4.2.4 Tensiones en el interior del pilote

La Figura VII-59 muestra las tensiones de origen térmico registradas por los sensores de fibra óptica. La figura con los datos obtenidos a partir de los extensómetros es muy similar.

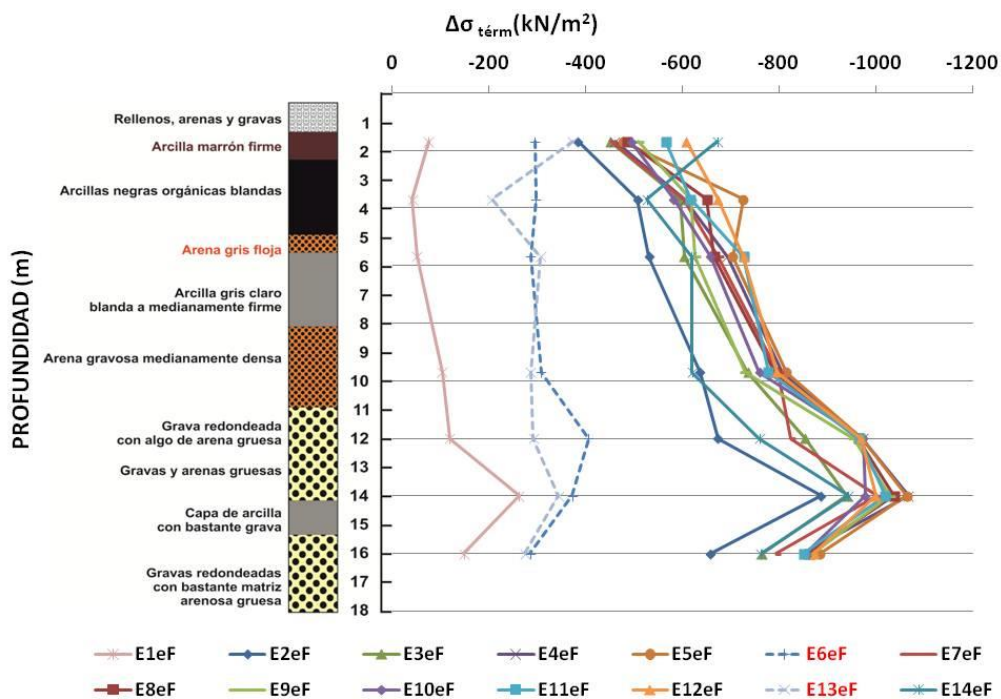


Figura VII-59. Evolución del incremento de tensión térmica en el interior del pilote en el momento Ee del ensayo E (Fibra óptica)

Todas las curvas muestran una tendencia a incrementar la carga con la profundidad hasta los 14 m. A partir de este punto, las cargas disminuyen hacia la punta del pilote. Se distinguen claramente las dos curvas correspondientes a los ciclos 6 y 13, domingos, durante los cuales no se inyectó calor en el pilote. Se observa que las cargas térmicas en estos dos ciclos disminuyen en gran medida, pero el pilote no llega a recuperarse del todo, lo que equivaldría a acercarse a la curva E1eF, próxima al inicio del funcionamiento del sistema.

El máximo incremento de tensión térmica (E12e) en los extensómetros es de -825 kN/m^2 a una profundidad de 13 metros, mientras que la fibra óptica registra un valor de -1100 kN/m^2 a la misma profundidad.

VII.4.2.5 Carga total en el interior del pilote

Se representa en la Figura VII-60 la evolución de las curvas de carga total (mecánica + térmica) en el momento Ee de todos los ciclos del ensayo E, obtenidas a partir de los sensores de fibra óptica. Los extensómetros muestran las mismas curvas con valores sensiblemente inferiores.

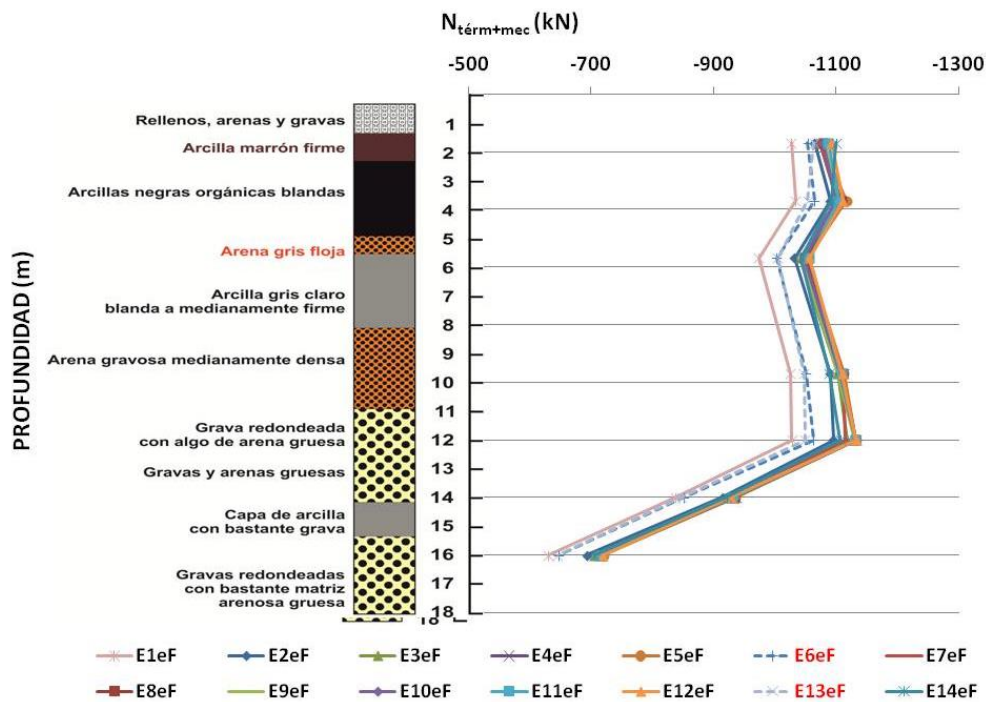


Figura VII-60. Evolución de la carga total con la profundidad en el momento Ee durante el ensayo E (fibra óptica)

Los resultados de ambas instrumentaciones presentan una evolución muy similar con la profundidad. En superficie, todas las curvas tienden a converger a 1000 kN, que es la fuerza mecánica aplicada por el gato hidráulico.

Todas las curvas resultan ser paralelas entre sí y muestran valores de carga muy parecidos. A lo largo de los 12 primeros metros de profundidad, la carga total se mantiene aproximadamente uniforme, lo que significa que existe poca absorción de la carga axil de origen térmico por el terreno. La mayor parte de incremento de carga térmica se transmite a partir de esa profundidad.

Se distinguen claramente las dos curvas correspondientes a los ciclos 6 y 13, domingos, durante los cuales no se inyectó calor en el pilote. Se observa que las cargas térmicas disminuyen en gran medida, pero el pilote no llega a recuperarse del todo.

La máxima carga de origen térmico, de compresión, registrada en el interior del pilote es de 130 kN a 14 metros de profundidad en el caso de la fibra y de 100 kN en el caso de los extensómetros, que, sumada a la distribución de carga de origen mecánico, 1000 kN situados en la cabeza del pilote, dan como resultado una carga axil total (térmica más mecánica) máxima del orden de un 10% mayor que la carga mecánica aplicada en cabeza. En definitiva, en términos de carga axil, la inyección de calor durante el ensayo E supone un incremento, si bien no substancialmente importante con respecto a la carga mecánica, tampoco despreciable.

Recordando el ensayo de caracterización térmica del sistema pilote-terreno (ensayo C), la influencia de las cargas térmicas en las cargas totales resultantes era más acusada, debido fundamentalmente a que las potencias térmicas inyectadas durante este ensayo son muy superiores a las inyectadas durante el ensayo E.

VII.4.2.6 Carga en la punta del pilote

Carga térmica en la punta del pilote

Por lo que se refiere a la carga de origen térmico en la punta del pilote a lo largo del ensayo E, se muestra su evolución en la Figura VII-61, a partir de los datos obtenidos por los extensómetros y los sensores de fibra óptica instalados a mayor profundidad. En todos los ciclos del ensayo, la máxima carga axil de origen térmico se produce

durante el momento Ee (21:00), momento en el que, aunque ya no se inyecta ninguna potencia térmica, el pilote ha acumulado la mayor parte de calor debido a las inyecciones térmicas que se han producido a lo largo de todo el día. Se observa también que los ciclos 6 y 13, correspondientes a domingos sin inyección de calor, el pilote se recupera parcialmente. La máxima carga axil que le llega a la punta del pilote es de -160 kN medida con los extensómetros y -125 kN medida con la fibra óptica.

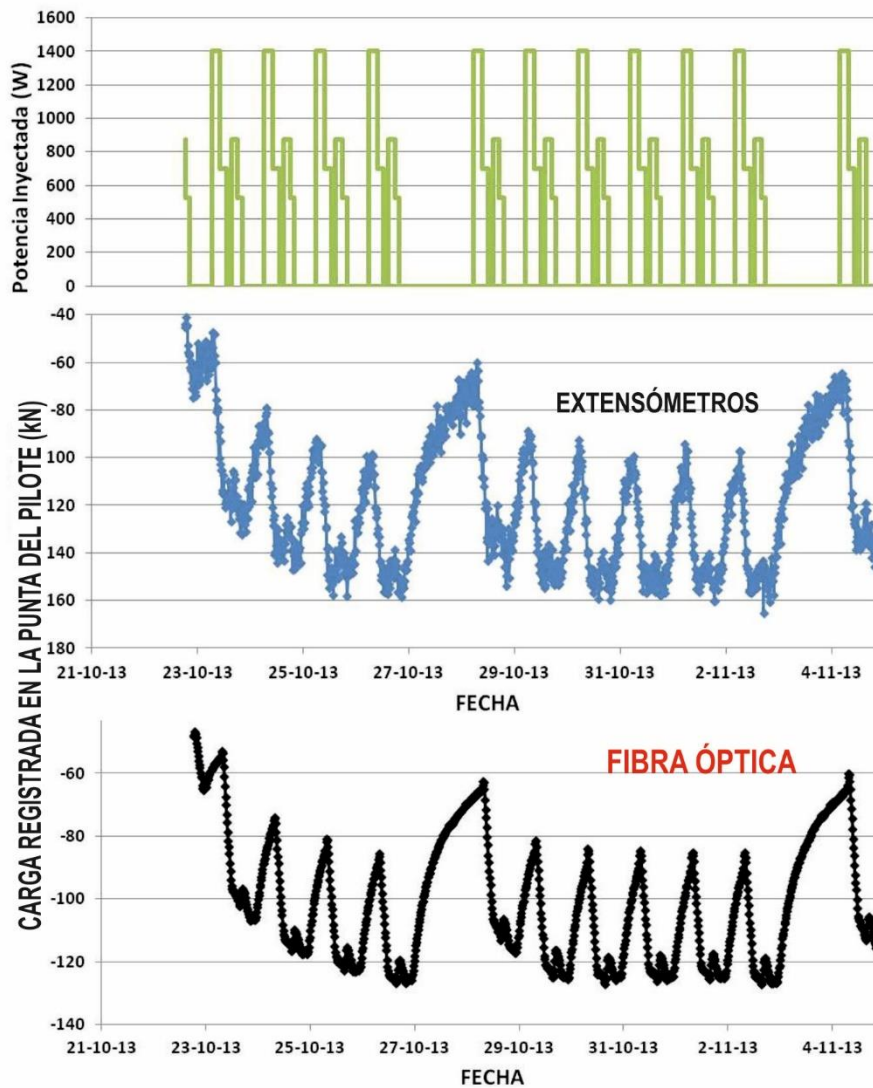


Figura VII-61. Evolución de la carga térmica en la punta del pilote a lo largo del ensayo E

Carga total en la punta del pilote

A continuación, se muestra la evolución de la carga térmica y carga total (mecánica + térmica) en la punta del pilote a lo largo del ensayo E, obtenida a partir de los datos de

extensómetros y sensores de fibra óptica instalados (Figura VII-62). La máxima carga axial que se produce es de 626 kN medida con los extensómetros y de 715 kN medida con los sensores de fibra óptica. Comparando esta carga con la resistencia por punta deducida del ensayo de hinca, en el momento de mayor carga por punta en el ensayo E, el pilote estaría trabajando a un 43,3% de su resistencia por fuste, según las medidas de los extensómetros, y a un 39,4%, según los sensores de fibra óptica, lo que equivale a un coeficiente de seguridad de 2,3 y 2,5, respectivamente. Estos coeficientes son algo inferiores a los deducidos para el ciclo 2, porque, conforme comentado, con la repetición de los ciclos se produce una acumulación de temperatura y de tensiones, que, aunque tiende a estabilizarse, es máxima en los últimos ciclos del ensayo E (en concreto en el ciclo 12º, puesto que, conforme referido, el 13º fue un domingo, lo que condujo a una suavización de las lecturas en el último ciclo, el 14º).

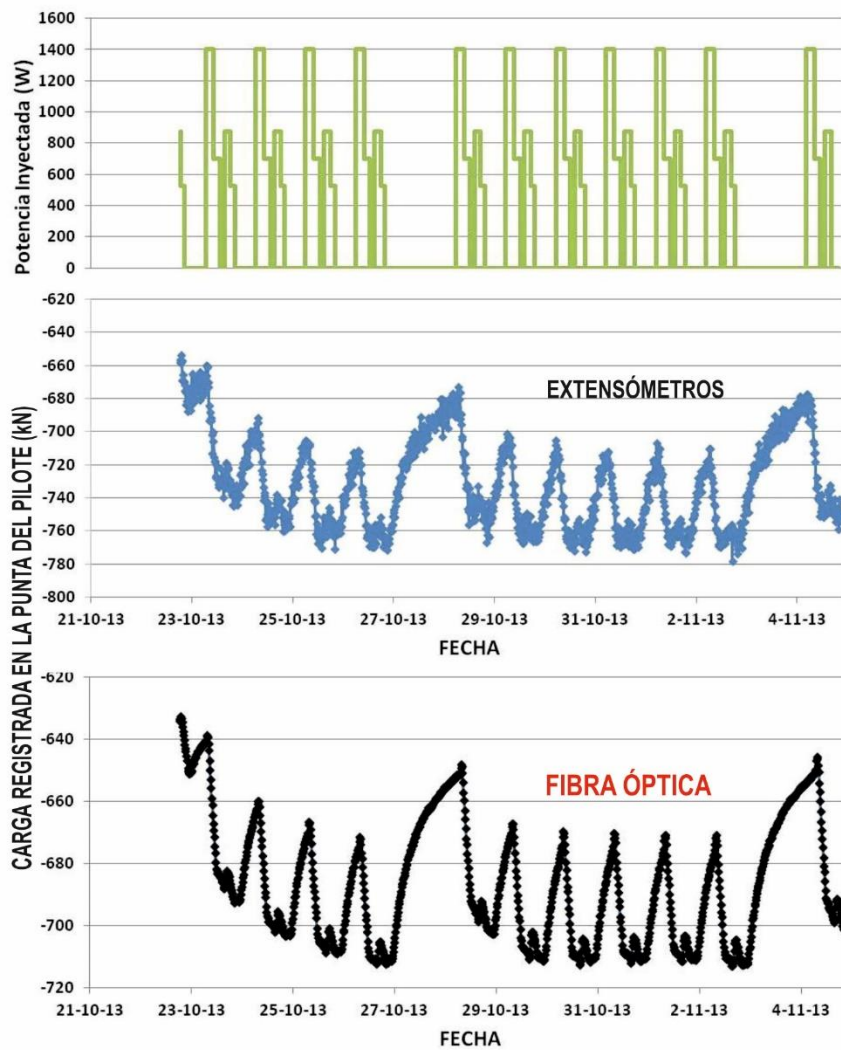


Figura VII-62. Evolución de la carga total en la punta del pilote a lo largo del ensayo E

VII.4.2.7 Tensión tangencial entre fuste y pilote

En la Figura VI-63 y en la Figura VI-64 se representa la tensión tangencial total entre terreno y fuste a lo largo de la longitud del pilote y en función de la secuencia de ciclos del ensayo E en el momento E_e , a partir de los extensómetros y de la fibra óptica, respectivamente. Todas las curvas son muy similares y se encuentran muy cercanas en el gráfico, y próximas a la correspondiente al pilote sin carga térmica, lo que indica que el comportamiento térmico de este pilote como elemento de una instalación geotérmica en condiciones reales de trabajo, no afecta en gran medida a las condiciones tenso-deformacionales del pilote y terreno circundante.

El efecto de las cargas térmicas presenta una tendencia en cada ciclo parecida a la del ensayo C (resistencia a la dilatación en la zona más superficial y en la zona más próxima a la punta del pilote), pero con una intensidad mucho menor, debido a la menor carga térmica inyectada.

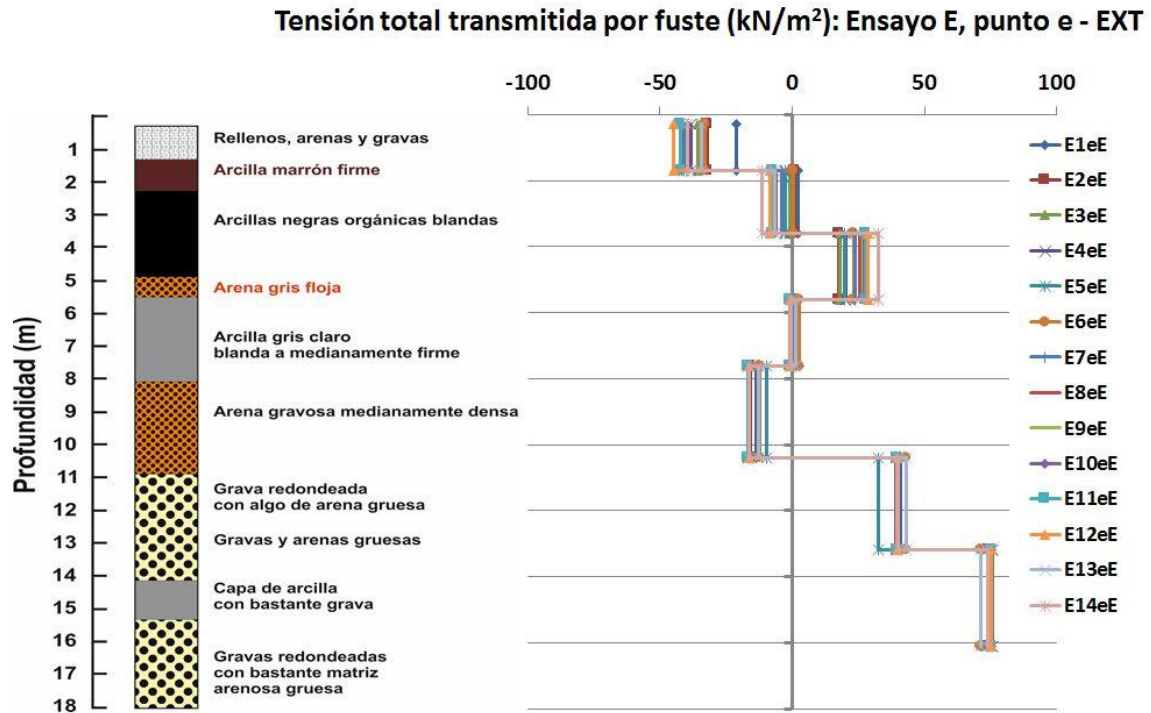


Figura VII-63. Tensión total transmitida al terreno por fuste (kN/m²) en el momento “e” de todos los ciclos del ensayo E (extensómetros).

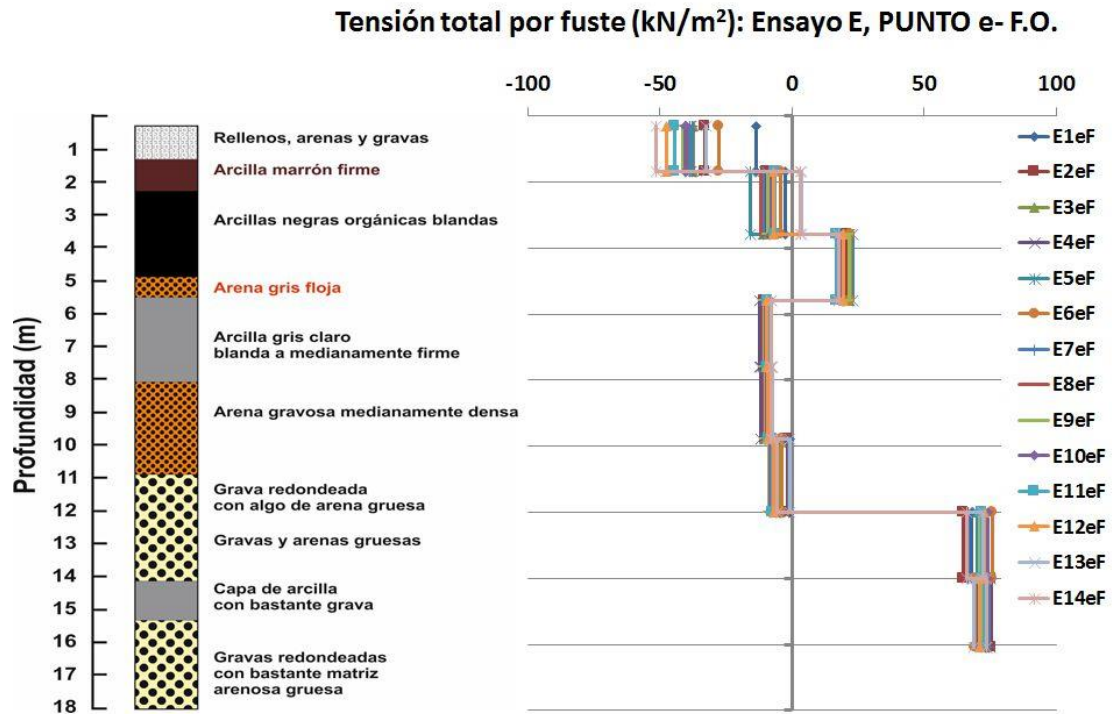


Figura VII-64. Tensión total transmitida al terreno por fuste (kN/m²) en el momento “e” de todos los ciclos del ensayo E (fibra óptica).

VII.5 ANÁLISIS DE RESISTENCIA DEL PILOTE EN TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS

Se recogen en la Tabla VII-23 los valores de la carga por punta, por fuste y total en cabeza de pilote durante los ensayos A, B, C y E, y se comparan con los valores de capacidad portante, resistencia por punta y resistencia por fuste del pilote determinados durante la hinca mediante el método CAPWAP.

Tabla VII-23. Carga total, por fuste y por punta, en los ensayos A, B, C, ciclo 2 del ensayo E (punto E2e) y ciclo 12 del ensayo E (punto E12e). Comparación con la capacidad portante del pilote, su resistencia por punta y por fuste (método CAPWAP)

CAPWAP	Resistencia por fuste (kN)	Resistencia por punta (kN)	Capacidad portante total del pilote (kN)
	711,3	1800	2511,3
	Carga por fuste (kN)	Carga por punta (kN)	Carga total (kN)
Ensayo A	412 58% C.S. = 1,7	588 33% C.S. = 3,1	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo B (EXT)	455 64% C.S. = 1,6	545 30% C.S. = 3,4	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo B (F.O.)	395 55% C.S. = 1,8	605 34% C.S. = 3,0	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo C (EXT)	216 30% -	784 43% C.S. = 2,3	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo C (F.O.)	70 10% -	930 52% C.S. = 1,9	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo E E2e (EXT)	384 54% -	616 34% C.S. = 3,2	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo E E2e (F.O.)	307 49% -	693 39% C.S. = 2,6	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo E E12e (EXT)	366 53% -	634 35% C.S. = 2,9	1000 40% C.S. = 2,5
Ensayo E E12e (F.O.)	280 40% -	720 40% C.S. = 2,5	1000 40% C.S. = 2,5

En primer lugar, las dos pruebas de carga estáticas, ensayos A y B, muestran unos valores muy similares. La aplicación de cargas estáticas hasta un máximo de 1000 kN

hace trabajar al pilote a un 60% de su resistencia por fuste y a un 32-33% de su resistencia por punta, aproximadamente, lo que equivale a coeficientes de seguridad de 1,7 por fuste y 3,1 por punta; y, en cuanto a coeficiente de seguridad total del pilote, de 2,5.

Con los ensayos C y E en los que se induce carga térmica en los pilotes, es necesario replantearse los conceptos de coeficiente de seguridad por fuste, por punta y total del pilote. Considerando que la capacidad portante total del pilote es de aproximadamente 2500 kN y que la carga mecánica en cabeza es constante, de valor 1000 kN, el coeficiente de seguridad total del pilote sería de 2,5 (y así se ha reproducido en la tabla). Sin embargo, la manera de trabajar del pilote es diferente, en estos casos, a la de un pilote exclusivamente cargado mecánicamente. Esto se debe a que la tendencia del pilote a dilatarse, cuando es calentado, o a comprimirse, cuando es enfriado, hace que se generen tensiones tangenciales en el contacto fuste-terreno de distinto signo a lo largo del perfil de profundidades. Si integramos estas tensiones tangenciales a lo largo del pilote, cargas de diferente signo se anulan entre sí, y la resultante del esfuerzo axial transmitido por el pilote al terreno es pequeña. No obstante, analizando las tensiones tangenciales por tramos, podemos comprobar cómo, en el ensayo C, sobre todo, y también en el E, el valor de estas tensiones tangenciales se aproxima al de la resistencia al corte en la interfaz pilote-terreno en las diferentes profundidades, pudiéndose considerar, por lo tanto, que en lo referente a la capacidad portante del pilote por fuste, con relación a posibles cargas mecánicas adicionales en cabeza, el margen de seguridad para el pilote estudiado está prácticamente agotado.

Por el contrario, en lo que respecta a la capacidad portante por punta del pilote, el concepto clásico del correspondiente coeficiente de seguridad se mantiene completamente en los ensayos C y E, siendo muy interesante observar cómo afectan las cargas térmicas a la carga por punta y al respectivo coeficiente de seguridad. Si en los ensayos A y B el coeficiente de seguridad por punta era de aproximadamente 3,1, en el ensayo C, de fuerte inyección térmica, este coeficiente baja a 2,1, lo que supone una reducción notable; y en el ensayo E, de inyección de calor más moderada pero repetida en una serie de ciclos diarios, el coeficiente se sitúa alrededor del valor 2,7 al cabo de 12 ciclos, lo que también supone una reducción de consideración con respecto al pilote sin carga térmica.

Se concluye, por tanto, que el funcionamiento térmico del pilote altera los mecanismos por los que resiste a las cargas mecánicas que le llegan a la cabeza, y hace disminuir los coeficientes de seguridad frente a la resistencia por fuste y por punta, en un grado

que debe ser considerado, en general, en cada caso, aunque en el caso estudiado pueda considerarse aceptable, y, por consiguiente, admisible el aprovechamiento geotérmico de este pilote para su función como elemento de cimentación.

Finalmente, conviene prestar atención al comportamiento estructural del propio pilote con relación al esfuerzo axil, porque la inyección de cargas térmica altera el valor máximo de este esfuerzo axil, así como la profundidad a la que se registra. De hecho, en los ensayos C y E puede comprobarse cómo se excede el máximo esfuerzo axil que se registraba en los ensayos A y B. En estos dos ensayos, en los que el pilote se carga sólo mecánicamente, el máximo valor del esfuerzo axil es de 1000 kN, que es la carga en cabeza; con la profundidad el esfuerzo axil va disminuyendo, a medida que el pilote va transfiriendo carga al terreno a través de tensiones tangenciales en el fuste. Sin embargo, la aplicación de cargas térmicas hace que aparezcan a diferentes profundidades esfuerzos axiles mayores de 1000 kN, o sea, mayores que la carga mecánica en cabeza. En la Tabla VII-24 se indica el valor máximo del esfuerzo axil y la profundidad a la que se verifica en los ensayos C y E. Como se muestra en la tabla, la inyección de calor incrementa el esfuerzo axil en el pilote en aproximadamente un 30% en el ensayo C y en un 12 % en el ensayo E, valores no despreciables que deben tenerse también en cuenta a la hora de diseñar el pilote.

Tabla VII-24. Máximo esfuerzo axil registrado durante los ensayos C y E y profundidad correspondiente.

Ensayo	Máximo esfuerzo axil (kN)	Profundidad (m)
Ensayo C (EXT)	1283	3,6
	1283	10,4
Ensayo C (F.O.)	1432	3,6
	1416	12,0
Ensayo E ciclo E2e (EXT)	1054	3,6
	1076	10,4
Ensayo E ciclo E2e (F.O.)	1097	3,6
	1097	12,0
Ensayo E ciclo E12e (EXT)	1114	3,6
	1100	10,4
Ensayo E ciclo E12e (F.O.)	1122	3,6
	1129	12,0

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

VIII.1 CONCLUSIONES

En el ámbito de la necesidad presente de reducir la dependencia de los combustibles fósiles que definen la realidad energética actual, la sociedad española necesita la introducción de energías renovables y eficiencia energética. La geotermia, energía almacenada en forma de calor bajo la superficie del terreno, se configura como una fuente de energía renovable, limpia y respetuosa con el medio ambiente que ya constituye una alternativa de uso extendido en otros países de Europa. En España existe un alto potencial de utilización de este tipo de instalaciones energéticas. Específicamente, los recursos geotérmicos de baja y muy baja temperatura son muy elevados en comparación con los de alta y media temperatura, extendiéndose prácticamente a todo el país.

De especial interés para la ingeniería son las instalaciones de aprovechamiento térmico, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, asociadas a elementos estructurales como muros-pantalla, losas o, como el caso del estudio que se propone, pilotes termo-activos. Este tipo de instalaciones innovadoras, que aprovechan la elevada capacidad de transferencia térmica del hormigón, deben cumplir tanto su función estructural como la de intercambiadores de energía con el terreno, esto último por medio de conducciones hidráulicas, situadas en el interior del pilote, por las cuales circula un fluido caloportador. Para asegurar un correcto funcionamiento, debe verificarse que ni el comportamiento estructural del pilote ni su capacidad portante (resistencia por fuste y por punta; resistencia del terreno) se ven significativamente afectados por los ciclos de intercambio de calor con el terreno.

Dentro del subprograma INNPACTO 2011, del programa nacional de cooperación público-privada del Ministerio de Ciencia e Innovación, se inició en 2011 un proyecto de investigación y desarrollo experimental (Proyecto PITERM: Caracterización termomecánica y nuevas técnicas de diseño de pilotes termo-activos) para el diseño, instalación, instrumentación y análisis del comportamiento de un pilote geotérmico experimental. El objetivo fundamental de este proyecto era estudiar el efecto combinado de las acciones mecánicas, geotécnicas y térmicas en el comportamiento de un pilote prefabricado hincado, activado térmicamente y debidamente instrumentado. En esta tesis doctoral se recoge en un único documento, de forma ordenada bajo criterios científico-técnicos, toda la información aprehendida, estudiada,

generada, acumulada, interpretada y deducida a lo largo del proyecto PITERM 2011-2014, y se realiza un análisis de conjunto de los resultados del estudio realizado.

Se ha necesitado de una gran cantidad de trabajo en términos de estudio previo de literatura existente, diseño de los ensayos, diseño de los sistemas de aplicación de solicitaciones y del propio pilote, elección y caracterización geotécnica del lugar idóneo para el ensayo, ejecución del conjunto, experimentación con control, medida y registro de las variables térmicas y geotécnicas e interpretación de la enorme cantidad de datos generados durante los tres años de experimentación. La secuencia de tareas ejecutadas en el seno de este proyecto, constituyen los diferentes capítulos de esta tesis.

La recopilación bibliográfica sobre el estado del conocimiento de los pilotes geotérmicos ha permitido conocer las actuaciones experimentales a escala real ejecutadas en los países más punteros como Austria, Alemania, Reino Unido, Suiza o Estados Unidos. Ha sido posible comprender el estado actual de conocimientos sobre el comportamiento termo-geotécnico de pilotes termo-activos tanto desde un punto de vista energético como en lo que se refiere al establecimiento del modelo de comportamiento termo-mecánico de estos elementos estructurales. La literatura consultada sugiere que la aplicación de cargas térmicas puede inducir modificaciones significativas en el sistema suelo-estructura, dando lugar a cargas adicionales que deben ser consideradas en el diseño de una cimentación termo-activa. Ello refuerza la necesidad de continuar llevando a cabo ensayos experimentales a escala real, como el que se estudia, que aporten más datos reales y faciliten la creación de un criterio técnico fundado sobre las posibilidades de este nuevo tipo de instalaciones energéticas y sobre los condicionantes que intervienen en su proyecto.

Previamente a la propia ejecución del ensayo, ha resultado de vital importancia realizar un correcto Diseño de la fase experimental, en tres aspectos diferentes:

- Diseño del pilote prefabricado para su construcción en escala real.
- Diseño de la instrumentación interna y externa necesaria y adecuada para la toma de datos.
- Diseño de los sistemas y protocolos de aplicación de las cargas mecánicas y térmicas.

Estas fases iniciales han resultado cruciales por lo novedoso de adaptar un pilote prefabricado al funcionamiento como intercambiador de calor geotérmico. Los casos analizados para la redacción del estado del conocimiento se refieren exclusivamente a

pilotes ejecutados *in situ*. La ampliación del estudio del comportamiento de los pilotes como intercambiadores térmicos a los pilotes hincados es una de las aportaciones más destacables de este trabajo. Se han abordado, por primera vez en España, numerosos retos de cuyo éxito dependía llevar a cabo el estudio. El diseño del pilote debía permitir la instalación de diversos sensores en el seno del hormigón, que registraran adecuadamente los parámetros de interés en el estudio. Estos sensores debían resistir el proceso de hinca en el terreno sin deteriorarse o salirse irremediablemente de rango. El elevado número de sensores ha llevado consigo necesariamente la utilización de un elevado número de cables y conexiones, cuya integridad debía ser igualmente garantizada. Además, el cableado debía atravesar la junta del pilote, formado por dos piezas, debido a su longitud, para resultar accesible al sistema externo de adquisición de datos, una vez hincado. Puede concluirse, en ese sentido, que el proceso de fabricación del pilote, de la instalación de sensores en su interior, el posterior hormigonado, su transporte, hinca y ensamblaje de las dos mitades, activación térmica y puesta en marcha de los ensayos ha sido totalmente satisfactorio, lo que demuestra la importancia de un buen diseño previo de todos los aspectos involucrados. De igual manera, resultó fundamental realizar un correcto diseño de los sistemas de aplicación de cargas mecánicas y térmicas, considerando los valores máximos, mínimos y rangos de aplicación, la secuencia temporal y la aplicación combinada de ambos tipos de sollicitación.

Antes de comenzar con los ensayos termo-mecánicos, ha sido necesario realizar una completa y correcta caracterización del pilote y su entorno, desde los dos puntos de vista que comprenden este proyecto: en primer lugar, una caracterización geotécnica del pilote a partir de los reconocimientos realizados en el local y mediante la ejecución de ensayos dinámicos de hinca que han permitido determinar la capacidad portante del mismo y su distribución entre punta y fuste, y establecer la carga mecánica de servicio para las pruebas térmicas. El comportamiento mecánico del pilote ha sido estudiado además por medio de la realización de ensayos de carga estática, que han permitido observar su forma de trabajo en cuanto elemento de cimentación y los coeficientes de seguridad por punta y fuste bajo la carga de servicio.

Por otro lado, ha sido necesaria una caracterización térmica del pilote. Para ello se ha realizado un ensayo de caracterización térmica siguiendo los fundamentos y bases del ensayo conocido como Thermal Response Test (TRT), adaptado a medida del pilote estudiado. No debe considerarse un TRT *sensu stricto*, ya que este ensayo está enfocado únicamente a sondeos geotérmicos o estructuras muy delgadas y alargadas

que permitan su modelación mediante la teoría de la fuente de calor lineal infinita. Sin embargo, con las necesarias correcciones, en particular, alargando considerablemente el tiempo de ensayo, ha sido posible llegar a unos resultados consistentes y coherentes con el conjunto del estudio. Ello demuestra que el TRT puede flexibilizarse y adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por la geometría del pilote, con el fin de que los resultados describan realmente la resistencia térmica del pilote y la conductividad térmica promedio del terreno que le circunda. Este ensayo de caracterización térmica (denominado ensayo C en este trabajo) ha permitido igualmente conocer el comportamiento termo-mecánico del pilote en condiciones extremas de aplicación de calor.

Finalmente, se han simulado las condiciones reales de funcionamiento de una instalación geotérmica durante 15 días en modo refrigeración (verano), es decir, calentamiento del pilote (ensayo E). El registro, análisis e interpretación de los datos obtenidos a partir de los múltiples sensores instalados han permitido estudiar el comportamiento térmico y geotécnico del sistema pilote-terreno como respuesta a las sollicitaciones aplicadas en cada momento.

De toda esta experimentación realizada, y descrita en esta memoria, cabe destacar una serie de observaciones importantes:

VIII.1.1 *Sobre el comportamiento térmico del pilote:*

Como elemento de intercambio y transferencia de calor, tanto los métodos analíticos como el modelo por elementos finitos preconizan un apropiado comportamiento térmico del pilote, lo cual se confirma fundamentalmente por la temperatura del fluido caloportador en cada momento del experimento. Los metros superficiales del pilote se ven afectados por la variación de la temperatura ambiental. El tipo de terreno que rodea el pilote a cada profundidad también determina el comportamiento térmico del conjunto, observándose curvas de cierta histéresis térmica, que no recuperan perfectamente las condiciones iniciales, cuando el suelo es más arcilloso. Por el contrario, la mitad más profunda del pilote, alejada de la influencia ambiental y rodeada de terreno granular (gravas y arenas), muestra una buena recuperación térmica del pilote. El radio de influencia térmica del pilote es de unos 3 metros.

VIII.1.2 *Sobre el comportamiento mecánico del pilote experimental:*

Los ensayos de carga estática realizados sobre el pilote han permitido establecer el comportamiento mecánico del mismo bajo la sollicitación mecánica de servicio de 1.000 kN de carga vertical en cabeza. El pilote, de 17,4 m de longitud, formado por dos trozos de 8,7 m unidos por una junta, como consecuencia de las características de los terrenos atravesados ha trabajado por fuste únicamente en los metros inferiores, de terreno más consistente, formado principalmente por gravas, y, obviamente, por punta. Las lecturas proporcionadas por la instrumentación instalada en el interior del pilote (extensómetros de cuerda vibrante y sensores de fibra óptica) han mostrado que en los 10-12 metros más superficiales, de suelos blandos, poco consistentes, el pilote no transmite carga al terreno. A partir de los cálculos analíticos realizados para proyectar el pilote, junto con los resultados de las pruebas de hinca, se dedujo una resistencia de punta y de fuste para el pilote de unos 1.800 kN y 700 kN, respectivamente. Las pruebas de carga estática (ensayos A y B) han mostrado que el pilote trabaja a aproximadamente 600 kN por punta y 400 kN por fuste, esto es, con coeficientes de seguridad por punta y por fuste de alrededor de 3 y de 1,7, respectivamente, siendo el coeficiente de seguridad global de 2,5 bajo la carga de servicio de 1.000 kN. Tanto la realización de diferentes ciclos de carga en el ensayo A como la repetición de este ensayo, debida a no haber podido obtener en él lecturas con la fibra óptica, realizando un segundo ensayo de carga (ensayo B), han revelado interesantes conclusiones con respecto al comportamiento mecánico de este pilote. Siendo semejantes las curvas de deformación vertical, medidas a lo largo del pilote, correspondientes a un mismo nivel de carga en cabeza, se observa que en los primeros ciclos de carga, para una misma carga en cabeza, las deformaciones verticales resultaron mayores en las ramas de descarga que en las de carga. La diferencia entre las ramas de carga y descarga se atenúa con los ciclos sucesivos. Por otro lado, el acortamiento total de pilote bajo la carga máxima en cabeza de 1.000 kN es el mismo en los dos ensayos de carga, del orden de 4,1 mm; sin embargo, el asiento medido en cabeza y el asiento deducido en la punta del pilote varían en los dos ensayos A y B. En el ensayo A estos asentamientos son de 7,2 mm y de 3,1 mm, respectivamente, mientras que en el ensayo B son de 5,3 mm y de 1,2 mm, respectivamente. Se comprueba que la diferencia se debe a un asiento remanente, no recuperable, en la punta del pilote que se produce fundamentalmente en los primeros dos ciclos del ensayo A, siendo, por el contrario, el comportamiento del pilote en este aspecto, en los restantes ciclos de este ensayo, así como en el ensayo B, de tipo elástico. Hay pues un ajuste en el contacto

punta del pilote-terreno en los primeros ciclos del ensayo A bajo la acción de las cargas mecánicas. En definitiva, las mediciones realizadas durante los ensayos A y B, tanto de las deformaciones en el interior del pilote, como de los movimientos en cabeza, han resultado de gran interés para comprender el comportamiento mecánico de este pilote, lo cual era absolutamente necesario para proceder al estudio de los efectos de las cargas térmicas, que han sido aplicadas en los ensayos siguientes con el pilote sometido a la carga vertical de servicio en cabeza.

VIII.1.3 *Sobre el comportamiento termo-mecánico del pilote:*

Durante el ensayo de caracterización térmica (ensayo C), en el cual la potencia térmica inyectada en el pilote fue considerable (120 W/m), se verificó un incremento importante de la temperatura en todo el pilote, el cual decrecía suavemente con la profundidad en todos los escalones de potencia. El incremento máximo fue de unos 16° en la zona superior y de unos 12° en el extremo inferior. Al cesar la inyección de calor, se produce una recuperación de las temperaturas iniciales siendo necesario un cierto tiempo para la disipación del exceso de temperatura generado. La recuperación de las temperaturas iniciales es total en la mitad inferior del pilote, y sólo parcial en los metros superiores, debido al efecto de la temperatura atmosférica (más elevada al finalizar el ensayo) y a la composición más arcillosa del terreno, y por tanto con más inercia térmica, en los niveles superiores.

Al ser calentado el pilote tiende a dilatar, lo que se refleja en los movimientos verticales medidos en la cabeza del pilote durante el ensayo. Estos movimientos de ascensión en la cabeza del pilote reflejan la evolución de temperaturas y alcanzan un valor máximo en torno a de 1,2 mm, lo que equivaldría a un tercio de la dilatación libre del pilote. En la punta, la tendencia a dilatar del pilote provoca un asiento adicional del orden de 0,4 mm

Con la aplicación de calor el pilote dilata (hasta un valor máximo de 1,6 mm), pero no todo lo que le correspondería, de acuerdo con el incremento de temperatura, si la dilatación fuera libre. El terreno constriñe esa dilatación por punta y por fuste, lo cual da lugar a que se generen tensiones verticales internas en el pilote, debidas a esta oposición del terreno a que dilate libremente. El perfil de estas tensiones de origen térmico responde a las características litológicas del terreno atravesado y las condiciones de contorno del ensayo, en particular en la cabeza. El sistema de

aplicación de cargas verticales empleado implica que durante la realización del ensayo de caracterización térmica, la carga vertical mecánica en cabeza se mantiene en un valor constante de 1.000 kN. Por este motivo, las tensiones de origen térmico en cabeza de pilote tienden a ser nulas, pues no hay oposición en este extremo a la dilatación. Por otro lado, a lo largo del fuste se observan dos zonas del terreno en las cuales éste se opone claramente a la dilatación: la zona superior, los 2 o 3 metros superiores (niveles de rellenos y arcillas desecadas); y la zona inferior de gravas. Entre estas dos zonas, entre las profundidades de 3 m y 12 m, aproximadamente, la resistencia que ejerce el terreno a la dilatación del pilote es mínima.

Las tensiones de origen térmico generadas por la oposición a la dilatación que ejerce el terreno se traducen en incrementos de la carga axil a lo largo del pilote. Con la aplicación de la máxima potencia térmica en el ensayo C, el incremento de carga axil llega a los 400 kN, medido entre las profundidades de 3 y 12 m. Este valor es considerable, comparado con los 1.000 kN de carga axil de origen mecánico. Los 400 kN de carga axil adicional son soportados por el terreno en la zona inferior del pilote distribuidos en razón de unos 60 kN por fuste y 340 por punta. Esto supone igualmente un incremento considerable de la carga por punta.

La aplicación de calor al pilote provoca una alteración de la distribución de las tensiones tangenciales entre fuste del pilote y terreno. Antes de la aplicación de calor, las tensiones tangenciales que ejerce el terreno sobre el pilote están orientadas hacia arriba, soportando parte de la carga mecánica aplicada en la cabeza; la otra parte se soporta por punta. Con la aplicación del calor, se produce en la zona superior del pilote un incremento de las tensiones tangenciales de signo contrario, de signo negativo, ya que el terreno se opone a la dilatación; estas nuevas tensiones tangenciales se restan a las de origen mecánico. Por el contrario, en la zona inferior del pilote, el incremento de tensiones tangenciales es positivo, sumándose a las de origen mecánico. El comportamiento observado en el pilote experimental responde bien al modelo teórico esperado, muy influido, no obstante, por las características litológicas locales. Así, en una amplia zona intermedia a lo largo del pilote, las variaciones de tensiones tangenciales pilote-terreno son mínimas. Al cesar la aplicación de calor, los incrementos de tensión tangencial (de distinto signo en la zona superior e inferior del pilote) tienden a disiparse.

En términos de cómo afecta la aplicación de calor al pilote en el ensayo C a la capacidad portante del pilote, se puede concluir que, al producirse un aumento considerable de la carga que llega a la punta del pilote, se produce una disminución

considerable del coeficiente de seguridad por punta, de un valor de aproximadamente 3 con la carga mecánica, a un valor de cerca de 2, bajo el efecto combinado de la carga mecánica y térmica; lo cual no deja de ser importante. Por lo que se refiere a la carga transmitida al terreno por fuste, el valor total, integrando las tensiones tangenciales a lo largo del pilote, disminuye, ya que se generan tensiones negativas en la zona superior debidas a la resistencia que ejerce el terreno a la dilatación del pilote. Se trata pues de una integración de tensiones de diferente signo. Sin embargo, analizando el valor de las tensiones tangenciales en los diferentes niveles, se puede afirmar que este valor se aproxima al de la resistencia fuste-terreno determinada tanto por métodos analíticos como a partir de los ensayos de hinca, lo cual indica que los márgenes de seguridad que ofrece la resistencia por fuste del pilote son muy pequeños, correspondiendo básicamente a la posibilidad de cambio de signo de las tensiones tangenciales en la zona superior. En definitiva, el coeficiente de seguridad total del pilote frente a cargas mecánicas cuando está sometido a la potencia térmica máxima utilizada en el ensayo C es significativamente menor que sin cargas térmicas. En todo caso, la potencia térmica empleada en el ensayo C es superior a la correspondiente una instalación geotérmica real, que es lo que se ha simulado en el ensayo E.

En el ensayo E, de simulación de cargas térmicas diarias en un edificio de oficinas en modo refrigeración (esto es, inyectando calor en los pilotes), el comportamiento observado en el pilote experimental ha sido, en general, semejante al del ensayo C, por lo que se refiere a los efectos de la inyección de calor, pero con incrementos de tensiones verticales y de cargas axiales en el pilote, y en general con variaciones en todas las magnitudes observadas más moderadas que en el ensayo C, debido a la menor potencia térmica máxima utilizada. El máximo incremento de carga axial es de un 12 %, y la carga en punta sube de unos 600 kN (sin carga térmica) a unos 700 kN, lo que equivale a una reducción del coeficiente de seguridad por punta hasta un valor de aproximadamente 2,5 (frente al valor de 3 sin carga térmica).

Es importante destacar en el ensayo E que, a lo largo de los ciclos diarios de inyección de calor reproducidos en el ensayo, se observa una tendencia a la estabilización del comportamiento, en lo que se refiere a las magnitudes observadas (incrementos de temperatura, tensiones internas, esfuerzos axiales, movimientos en cabeza), lo que indica que la explotación geotérmica del pilote sería sostenible a efectos no sólo térmicos sino mecánicos.

En resumen, relativamente al comportamiento termo-mecánico del pilote, puede concluirse lo siguiente:

- el funcionamiento térmico del pilote altera los mecanismos por los cuales éste resiste las cargas mecánicas que le llegan a la cabeza;
- hay alteraciones drásticas en la resistencia movilizada por fuste, con cambios en el signo de las tensiones tangenciales entre fuste y terreno;
- con el calentamiento del pilote, la carga por punta aumenta;
- en la redistribución de las tensiones y cargas transmitidas al terreno, hay una fuerte influencia del perfil litológico;
- se verifica una disminución de los coeficientes de seguridad por fuste y por punta, que es importante tener en cuenta a efectos de proyecto en cada caso;
- se verifica un aumento de la carga axil en el pilote, que debe ser tenido en cuenta en su dimensionamiento como elemento estructural;
- en el caso estudiado, la disminución de los coeficientes de seguridad en la simulación de los ciclos de explotación diarios podría considerarse aceptable, y, por tanto, el aprovechamiento geotérmico del pilote sería admisible en lo que respecta a su función como elemento de cimentación.

Debe destacarse también la importancia de la temperatura ambiental en el desarrollo experimental del ensayo: Se ha manifestado una elevada influencia de la temperatura ambiente en la temperatura del pilote y del terreno hasta una profundidad variable en torno a 6 m. Este fenómeno afecta a la distribución de isotermas en el pilote y el terreno y, por tanto, a la eficiencia en la transferencia de calor entre ellos. La importancia de la temperatura del aire se hace evidente tanto en los procesos de calentamiento como de enfriamiento, que se pueden ver acelerados o retardados por las condiciones ambientales.

Con respecto a los sensores empleados, puede afirmarse que las deformaciones verticales medidas con los sensores de fibra óptica son consistentes y del mismo orden de magnitud que las medidas con los extensómetros de cuerda vibrante, siendo estos más robustos para su uso en este tipo de ensayos.

VIII.2 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

A fin de avanzar con el estudio realizado en esta tesis, se proponen a continuación diferentes aspectos que resultarían de especial interés para su posterior investigación:

- Esta tesis se desarrolla con una tipología de terreno, en la que existen 2 tramos de terreno diferenciados. El pilote estudiado ha trabajado fundamentalmente por punta. El estudio y la experimentación de pilotes geotérmicos en otras tipologías de terreno y con otras formas de trabajo (pilotes flotantes, que resisten por fuste, por ejemplo) permitiría reforzar los conocimientos sobre el comportamiento de estos pilotes.
- En los ensayos realizados en este pilote, se ha utilizado una carga mecánica constante en cabeza para simular las cargas transmitidas por la edificación. No se han impuesto, por lo tanto, restricciones a los movimientos en cabeza. Sería interesante experimentar con pilotes en los que se impusiera una restricción en cabeza, permitiendo el aumento de las cargas verticales como reacción a la tendencia a la dilatación durante el calentamiento del pilote.
- Las pruebas térmicas realizadas se han llevado a cabo en modo refrigeración, esto es, calentando el pilote; sería interesante analizar en detalle el comportamiento del pilote en modo calefacción, es decir, extrayendo calor y enfriando el pilote.
- El estudio se ha realizado con un único pilote prefabricado; para poder comprobar la influencia de calentar más pilotes alrededor, sería necesario realizar un estudio en una obra real con un número de pilotes que permitiese observar el efecto de calentamiento y disipación de calor con más pilotes geotérmicos alrededor. El análisis de la respuesta de un grupo de pilotes geotérmicos puede dar un resultado más crítico en términos de desplazamientos o tensión, si hay diferencias de comportamiento en cada uno de los pilotes y en función de la rigidez del encepado en cabeza.
- En esta tesis no se han estudiado las alteraciones que el calentamiento del pilote puede provocar en el terreno contiguo; en particular, no se ha analizado la influencia de posibles cambios en las presiones intersticiales; para proyectos futuros sería de gran utilidad disponer de sensores de presión intersticial en el fuste del pilote y en sondeos cercanos, para observar hasta qué distancia tiene influencia el aumento de temperatura que se produce en el pilote.
- En función de las condiciones geotécnicas de los emplazamientos, sería interesante estudiar el efecto del flujo de aguas subterráneas, en terrenos permeables, en el comportamiento geotérmico de este tipo de pilotes, en concreto en lo que se refiere a la disipación de calor.
- En este trabajo, en el pilote se ha empleado una tubería de acero en el interior, para poder introducir las tuberías de polietileno; este material es de elevado coste en una obra real. Convendría considerar y analizar otros sistemas de integrar las tuberías geotérmicas en este tipo de pilotes, en concreto durante la fabricación de los mismos, utilizando materiales apropiados, evitando que se puedan dañar durante la hinca, y con costes adecuados para una fabricación estándar de pilotes prefabricados geotérmicos;
- La utilización de modelos numéricos, por ejemplo, de elementos finitos, para reproducir las observaciones y resultados experimentales obtenidos en estos ensayos sería de gran interés; una vez calibrados los modelos, podrían utilizarse para analizar en profundidad el comportamiento del suelo,

de la interfaz suelo-pilote y del propio pilote bajo diferentes condiciones. Sería interesante modelar la temperatura y el flujo de agua a través de una formulación completa basada en los modelos termo-hidro-mecánicos.

CAPITULO IX
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AENOR(1994). *UNE 103801:1994 Geotecnia. Prueba de penetración dinámica superpesada*. Madrid
- AENOR (2001). *UNE-EN 12699:2001 Realización de trabajos geotécnicos especiales. Pilotes de desplazamiento*. Madrid
- AENOR (2006). *UNE-EN 12794:2006+A1:2008:Productos prefabricados de hormigón. Pilotes de cimentación*. Madrid
- AENOR(2006). *UNE-EN ISO 22476-3:2006 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 3: Ensayo de penetración estándar*. Madrid
- AENOR (2016). *UNE-EN 1997-1:2016. Eurocodigo 7:Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas Generales*. Madrid
- Adam, D., Hofinger, J., & Ostermann, N. (2001). Utilisation of Geothermal Energy from Railway Tunnels. *Proc.Int.Conf.Soil Mech.And Geotech.Engineering.*, (págs. Vol 3 pp 2029-2034). Istanbul, Turkey.
- Adam, D., & Markiewicz, R. (2003). Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile Teil 3: Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen. *Österreichische Ingenieur-und Architektenzeitschrift (ÖIAZ)*, 148(1).
- Adam, D., & Markiewicz, R. (2006). Energy geocomposites for tunnels. *Proc.8th.Int.Conf.On Geosynthetics*, (págs. 677-682). Yokohama, Japan.
- Amis, T. (2008). Energy Piling in th UK. *Energy Piles A developing technology*. Londres: Institution of Civil Engineers.
- Amis, T. (2011). Energy Foundations in the UK. In Ground Source Live Sustainable heating & cooling. G.S.H.P. Association, ed. Peterborough, Inglaterra.
- Árcos Álvarez, J. L., & De Juan García, M. A. (2007). *Pilotes prefabricados: Una solución óptima para cimentaciones profundas*. Prefabricados de hormigón.
- ASTM D 5334-08: “Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure”
- ASTM-D 4945-00. “Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles”
- Badenes, B. (2013). *Modelado térmico de un pilote termoactivo y validación experimental*. Trabajo de fin de Máster. Master Universitario en Investigación Matemática. Universidad Politécnica de Valencia, 78 pp.
- Bandos TV, Montero Á, Fernández E, Santander JLG, Isidro JM, Pérez J, Fernández de Córdoba PJF, Urchueguía JF (2009): “Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations. *Geothermics* 38(2):263–370
- Bandos TV, Montero Á, Fernández de Córdoba PJF, Urchueguía JF (2011) “Improving parameter estimates obtained from thermal response tests: effect of ambient air temperature variations” *Geothermics* 40(2):136–143

- Barrero, A. (2008). *Energía Geotérmica y del mar*. Madrid.Patrocinio Iberdrola.
- Bear,J.(1972), *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publ.Co.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N. (2006): Capítulo 9 "Conductividad térmica y los mecanismos de transporte de energía" en "Fenómenos de transporte" 2ª ed. México: Limusa Wiley, 2006. 1062 p. ISBN: 968-1 8-6365-8.
- Boënnec, O. (2009).Piling on the energy. Geodrilling International.
- Bourne-Webb, P, et al.(2009). Energy pile test at Lambeth College, London:geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Geotechnique* 59(3):237-48.
- Brandl, H. (2006). Energy Foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique* 56(2), 81-122.
- Brinch Hansen, J. (1970): "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity". *Danish Geotechnical Institute*, Bulletin No 28.
- Bristow, K.L.; Kluitenberg, G.J. & Horton, R. (1994). "Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique". *Soil Science American Journal*, Vol. 58, pp. 1288-1294
- Burland, J. B. 1973. Shaft Friction of Piles in Clay –A Simple Fundamental Approach, *Ground Engineering*, Vol. 6(3), 30-42.
- Caquot, A. I., and J. Kerisel, (1948) "*Tables for the calculation of passive pressure, active pressure, and bearing capacity of foundations*," Libraire du Bureau des Longitudes, de L'ecolePolytechnique, Paris Gauthier- villars, Imprimeur-Editeur, 120.
- Das, B. (1998). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning Editores S.a. De C.V.
- De Santiago, C., & Pardo de Santayana, F. (2009). Aprovechamiento de la energía geotérmica superficial en la obra pública. *Ingeniería Civil* 156, 102-112.
- DIRECTIVA 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. DOUE.
- EGEC. (2007). *Geothermal snow melting and de-icing*. European Geothermal Energy Council www.egec.org.
- Eugster, W. J. y Sanner, B. (2007, 30 May-1 June 2007). *Technological status of shallow geothermal energy in Europe*.European Geothermal Congress, Germany.
- Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: general rules, EN 1997-1:2004. European Committee for Standardization. Brussels, 2004. 225 p.
- Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: design assisted by laboratory testing. EN 1997-2:2000. European Committee for Standardization. Brussels, 2000. 107 p.

Fraile, J. y Garcia, P. (1987). *Instrumentacion Aplicada a la ingenieria*. Madrid: Catedra de Electrotecnica , Escuela de Caminos, UPM.

Fraile, J.; Garcia, P. y Fraile, J. (2013). *Instrumentación aplicada a la Ingeniería*. Madrid.

Geoplat. *Visión a 2030*. Madrid: Ministerio de ciencia e Innovación.

Glisic, B., & Inaudi, D. (2007). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. Wiley.

Goble, G., & Hussein, M. (1994). Dynamic Pile Testing in Practice. *XIII ICSMFE*, (págs. 713-716). New Dehli.

GSHPA 2012 Thermal Pile Standards: Design, Installation & Materials. GSHPA, ed. Kavanaugh, S.P., Xie, L. and Martin, C. (2001). *Investigation of methods for determining soil and rock formation from short term field tests*. ASHRAE 1118-TRP, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 77 pp.

Hellström, G. (1991). *Ground heat storage*, Thermal Analyses of Duct Storage System. PhD thesis, Lund University (LTH).

Hutchinson, F. (1970). Environmental pollution from highway de-icing compounds. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol pp 144-146.

Jaeger Carlslaw (1959). *Conduction of heat in solids*. 1959.

Katzenbach, R., Clauss, F., Waberseck, T., & Wagner, I. (2007). Geothermal Site Investigation - Present Developments of the Geothermal Response Test, Geothermal Resources Council Transactions. *Renewable Baseload Energy: Geothermal Heat Pumps to Engineered Reservoirs*, (págs. Vol 31. pp.477-481). Reno, Nevada, USA.

Kerisel, J., Tchen, Y., & L'Herminier, R. (1965). Resistence de pointe en milieu pulverulent de divers serrages. *Proc. Int.Conf.Soil Mech.Found.Eng, 6th*, (págs. 265-269). Montreal.

Laloui, L. et al.(1999). Heat exchanger pile:effect of the thermal solicitations on its mechanical properties. *Bulletin d'Hydrogeologie 17*.

Laloui, L.,Matteo N., and Laurent V. (2003).Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal 40(2):388-402*.

Laloui, L, Matteo N., and Laurent V. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics 30(8):401-13*.

Laloui,L & Nuth,N.(2009). On the use of the generalised effective stress in the constitutive modelling of unsaturated soils. *Computers and Geotechnics 36(1),20-23*

Laloui, L. (2011). In-situ testing of heat exchanger pile. *Proc. of the GeoFrontiers 2011*. Dallas, Texas.

- Llopis, G. y y Rodrigo, V. (2008). *Guía de la energía geotérmica*. Comunidad de Madrid.
- Mands, E.y Sanner, B. Shallow Geothermal Energy. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar
- Markiewicz, R., & Adam, D. (2005). Extraction of Geothermal Energy from Tunnel. *16 th Int. Conference of ISSMGE*, (págs. 1629-1635). Osaka.
- Mapa Geotécnico General Hoja 8-7/56: VALENCIA. Escala 1:200.000 Instituto Geológico y Minero de España, Dirección General de Minas, Ministerio de Industria. 1973
- Mattsson, N., Steinmann, G. & Laluoui, L. (2007). In-situ thermal response testing – New developments. *Proc. European Geothermal Congress. Unterhaching, Germany, 30 May – 1 June*
- Maunsell/AECOM, Faber (2009). Geotechnical aspects of energy geo-structures. *In Workshop on Energy Geo-structures*. Ecole Polytechnique de Lausanne, Switzerland.
- Mazariegos, A., Anton, L. C., Valle, R., Urchueguía, J., Quilis, S., Martinez, S., & Magraner, T. (2009). Pilotes y Pantallas Termoactivas. *Ingeniería Civil*. 156,3-20.
- McCartney, J.S., Rosenberg, J.E. and Sultanova, A. (2010). Engineering performance of thermoactive foundation systems. *GeoTrends: The progress of Geological and Geotechnical Engineering in Colorado at the Cusp of a New Decade*. ASCE Geotechnical Practice Publication 6. Goss, C.M., Kerrigan, J.B., Malamo, J.C., McCarron, M.O., and Wiltshire, R.L. pp. 27-42
- McCartney, J.S. Rosenberg, J.E. (2011). Impact of Heat Exchange on Side Shear in Thermo-Active Foundations. *Geo-Frontiers 2011 Conference, ASCE, Dallas, Texas, USA, March 13-16, 2011*
- McCartney, J.S. (2011). Engineering performance of energy foundations. *PanAm CGS Geotechnical Conference. Toronto, Canada. October 2-6, 2011. 14 pp.*
- McCartney, J.S. and Murphy, K.D. (2012). Strain Distributions in Full-Scale Energy Foundations. *DFI JOURNAL Vol. 6 No. 2, pp. 26-38*
- Ministerio de Vivienda: Código Técnico de la Edificación (CTE): Aprobado por RD 314/2006 de 17 de marzo (BOE del 28/03/2006).
- Temas específicos de cimentaciones: Documento Básico SE-C: Seguridad estructural. Cimientos (BOE 25/01/2008).
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras: Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera (GCOC-09) (2009).
- Ministerio de Fomento. Puertos del Estado: Recomendaciones para obras marítimas: Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5-05) (2005).

- Mogensen, P. (1983). Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. The international Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice.
- Montero, A., Urchueguía J, F., Martos, J.,Badenes,B., and. Picard, M.A (2013). Ground temperature profile while thermal response testing. European Geothermal Congress (EGC). Pisa (Italy)
- Muzás, F. (2007). Mecánica del Suelo y Cimentaciones. Vol II. Tema 31: Introducción a las cimentaciones profundas. Universidad Nacional de Educación a Distancia - Fundación Escuela de la Edificación. ISBN 978-84-96555-06-8.
- NEN 6743:1991/A1:1997. Geotechniek – Berekeningsmethode voor Funderingen op Palen –Drukpalen
- Olgun, C. Guney, Martin, J.R., Abdelaziz, S.L., Lovino, P.L., Elks, C., Fox, C. and Gouvin, P. (2012): Field testing of energy piles at Virginia Tech. *Proc. 37th Annual Conference on Deep Foundations*, Houston, TX, USA (2012)
- Ouyang E., K. S. (2011a). Research on The Long Term Performance of Energy Piles (Field Installation). Ground Source Heat Pump Association.
- Ouyang, E., Soga, K. & Leung, Y.F. 2011b. Numerical Back-Analysis of Energy Pile Test at Lambeth College, London.*Geo-Frontiers 2011. ASCE Geotechnical special publication* 21:440-449.
- Ozudogru, T., Brettmann, T., Olgun, G., Martin, J. and Senol, A. (2012). Thermal conductivity testing of energy piles: Field testing and numerical modelling. *ASCE GeoCongress 2012*. Oakland, CA. march 25-29th, 2012. 10 pp.
- Pahud, D., & Hubbuch, M. (2007). Measured Thermal Performances of the Energy Pile System of the Dock Midfield at Zürich Airport. *European Geothermal Congress European Geothermal Congress 2007*. Unterhaching, Germany.
- Peron, H., Knellwolf, C., & Laloui, L. (2011). A Method for the Geotechnical Design of Heat Exchanger Piles. *Proc. of the GeoFrontiers 2011*. Dallas,Texas.
- Senser, D. W. (1982). *Performance Evaluation of a Runway Heating System Utilizing a Low Grade Energy Source and Heat Pipes*. University of Wyoming, Laramie, WY, 123
- SIA D-0190 (2005): *“Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance”* Societe Suisse des ingenieurs et des architectes.”
- Spitler, J., & Hogue, T. (1995). *Prevention of bridge deck icing using geothermal heat*. Oklahoma State University.
- Stewart, M.A. and McCartney, J.S. (2012). *“Strain Distributions in Centrifuge Model Energy Foundations.”* Proc., GeoCongress 2012 (GSP 225). R.D. Hryciw, A. Athanasopoulos-Zekkos, and N. Yesiller, eds., ASCE, Reston, VA. pp. 4376-4385.
- Stewart, M.A. and McCartney, J.S. (2013). *“Centrifuge Modeling of Soil-Structure Interaction in Energy Foundations.”* ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 140(4), 04013044-1-11. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001061.

Vesic, A. S. (1977). “*Design of pile foundations.*” Nat. Cooperative Hwy. Res. Program Synthesis of Pract. No. 42, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Wang, H., Zhao, J., & Chan, Z. (2008). Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water. *Energy conversion and management*, Vol 49 pp 1538-1546.

Wihelm, J., & Rybach, C. (2003). The geothermal potential of Swiss Alpine tunnels. *Geothermics*, 32/4.

www.micronoptics.com. Micron Optics

www.monitran.co.uk. Monitran

www.sensy.com Sensy.

<http://www.mgs.co.uk> Geosense.

www.enercret.com Enercret

www.alava-ing.es. Alava Ingenieros

www.geo-slope.com

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1. Terminología y transferencia de cargas de un pilote (Muzás, 2007)	18
Figura II-2. Clasificación de pilotes (a partir de UNE-EN 12699:2001 y CTE)	20
Figura II-3. Elementos de refuerzo en un pilote	21
Figura II-4. Carga de hundimiento de un pilote aislado (Muzás, 2007)	22
Figura II-5. Valores límite del coeficiente N^*q (Caquot and Kérisel, 1948).....	25
Figura II-6. Adherencia de pilotes en arcilla saturada (Muzás, 2007)	26
Figura II-7. Forma de rotura y zonas para la resistencia de punta (ROM-05, 2005)	28
Figura II-8. Relación entre N_{30} y r_f con R_p (Muzás, 2007)	31
Figura II-9. Resistencia por fuste en terreno coherente (Muzás, 2007)	32
Figura II-10. a) Tendencia de la temperatura del terreno a permanecer constante durante todo el año a partir de una profundidad de 10-15 m. (Brandl, 2006), b) Perfil térmico del terreno en diferentes meses del año. ...	43
Figura II-11. Rangos de posibles gradientes geotérmicos en la Tierra.	44
Figura II-12. Sistema abierto (Mands & Sanner, www.UBeG.de).....	47
Figura II-13. Sistema cerrado de colectores de calor horizontales conectados en serie o en paralelo (Mands & Sanner, www.UBeG.de).....	49
Figura II-14. Sistema cerrado vertical y tipos de intercambiadores de calor	50
Figura II-15. Esquema de un túnel con anclajes y geocompuestos termo-activos, además de sondas geotérmicas instaladas en la plataforma	53
Figura II-16. Sección transversal del túnel Lainzer (www.enercret.com)	54
Figura II-17. Sección transversal de la estación de metro U2/2-Taborstraße con pantallas termoactivas. Ubicación de los sensores instalados (Brandl, 2006)	55
Figura II-18. Tablero de puente en Oklahoma State University, Stillwater, E.E.U.U	57
Figura II-19. Esquema de edificio con pilotes geotérmicos (Pahud, 2007)	58
Figura II-20. Esquema de un LVDT (Fraile & García, 1987)	60
Figura II-21. LVDT empleado	62
Figura II-22. Comparador o flexímetro (Fraile et al., 2013)	63
Figura II-23. A) Esquema de extensómetro de cuerda vibrante para embeber en hormigón.	65
Figura II-24. A) Sección transversal de una célula de carga (Fraile et al., 2013).	66
Figura II-25. Puente de Wheatstone	67
Figura II-26. Extensómetro con termistor incorporado (www.mgs.co.uk).....	69
Figura II-27. Equipo YSI proPlus.....	70
Figura II-28. Principio de medida del sensor de fibra de Bragg (www.alava-ing.es)	71
Figura II-29. Perfil del sensor os 3600. (www.micronoptics.com).....	71
Figura II-30. Hoja de calibración tipo del sensor os3600.(www.micronoptics.com).....	73
Figura III-1: Número de pilotes energéticos instalados en Austria (Brandl, 2006).....	78
Figura III-2: Vista parcial de la pantalla de pilotes termo-activos anclados, ladera arriba del edificio. (Brandl, 2006)	79
Figura III-3: Cimentación del Centro de Rehabilitación de Bad Schallerbach, Viena. (Brandl, 2006)	80
Figura III-4: Deformaciones medidas en un pilote geotérmico entre febrero de 1996 y febrero de 1998, debidos a las cargas mecánicas y a la temperatura (modificado de Brandl, 2006).....	81
Figura III-5: Instrumentación colocada en el pilote de la EPFL (Laloui et al., 2006).....	82
Figura III-6: Secuencia de cargas termo-mecánicas en el ensayo (Laloui et al., 2006)	83
Figura III-7: Evolución de las deformaciones (ϵ , $\mu\text{m/m}$) durante un ciclo térmico a dos profundidades del pilote: 6,5 m (izquierda) y 24,5 m (derecha) (Laloui, 2011)	84
Figura III-8: Desplazamiento vertical del pilote en los siete ensayos del estudio	85
Figura III-9: Distribución de esfuerzos de origen mecánico, térmico y combinado a lo largo del pilote a) datos experimentales b) simulación numérica (Laloui et al., 2006)	86
Figura III-10: EnergyPiles® instalados en Inglaterra (Amis, 2011).....	86
Figura III-11: Datos del proyecto de Lambeth College (Faber Maunsell/AECOM, 2009)	87
Figura III-12: Esquema del estudio realizado en Lambeth College. Bourne-Webb, et al. (2009)	88
Figura III-13: Instrumentación instalada en el pilote (Bourne-Webb et al., 2009).....	89
Figura III-14: Evaluación de la respuesta térmica efectiva del pilote de Lambeth College.....	90
Figura III-15: Control de carga y desplazamiento de la cabeza del pilote de Lambeth College a lo largo del ensayo (Bourne-Webb et al., 2009).....	91
Figura III-16: Detalles de la instrumentación en el complejo Bankside	93
Figura III-17: Detalle del programa de diseño de pilotes geotérmicos (Ouyang, 2011).....	93
Figura III-18: Campo de ensayos GEP (Modificado de Olgun et al., 2012).....	94
Figura III-19: Temperatura de entrada en el pilote durante el ensayo termo-mecánico	95
Figura III-20: Evolución del perfil de cargas a lo largo del pilote durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento del ensayo térmico (Olgun et al., 2012)	96

Figura III-21: Planta de la cimentación del edificio y localización de los dos pilotes termoactivos (McCartney and Murphy, 2012).....	97
Figura III-22: Perfil litológico y localización de los sensores a lo largo de los pilotes	97
Figura III-23: Variación estacional del perfil térmico de los pilotes.....	98
Figura III-24: Perfiles de deformación y de tensiones internas de origen térmico con la profundidad en los dos pilotes durante el funcionamiento de la instalación geotérmica	99
Figura III-25: Izq) Deformaciones axiales debido a la carga mecánica y durante el calentamiento y enfriamiento de los dos pilotes. Dcha.) Relación entre el salto térmico y la deformación sufrida en los pilotes en modo calefacción y refrigeración (McCartney and Murphy, 2012)	100
Figura III-26: Deformación y carga axial en un pilote debido a su calentamiento (funcionamiento en modo calefacción) y enfriamiento (funcionamiento en modo refrigeración) sin restricción de movimientos (modificado de Bourne Webb et al., 2009).....	102
Figura III-27: Deformación y carga axial en un pilote debido a su calentamiento (funcionamiento en modo calefacción) y enfriamiento (funcionamiento en modo refrigeración) con movimiento totalmente restringido (modificado de Bourne Webb et al., 2009).....	103
Figura III-28: Pilote sometido a una carga mecánica sin variaciones térmicas	105
Figura III-29: Enfriamiento del pilote en modo calefacción, sin aplicación de carga mecánica	105
Figura III-30: Calentamiento del pilote en modo refrigeración, sin aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009a).....	106
Figura III-31: Enfriamiento del pilote en modo calefacción con aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009a).....	106
Figura III-32: Calentamiento del pilote en modo refrigeración con aplicación de carga mecánica (modificado de Bourne-Webb et al., 2009a).....	107
Figura IV-1: Emplazamiento del pilote en el campus de la UPV (https://maps.google.com/).....	114
Figura IV-2: Mapa Geológico 1:50.000 de la serie MAGNA (IGME, 1974)	115
Figura IV-3: Sección vertical del terreno reconstruida a partir de la descripción del testigo extraído del sondeo, con la localización de los ensayos de caracterización realizados.....	117
Figura IV-4: Curva obtenida durante el ensayo DPSH.....	119
Figura IV-5: Localización de las muestras en el testigo obtenido del sondeo	120
Figura IV-6: Variación con la profundidad de la composición granulométrica de los materiales estudiados en laboratorio.....	123
Figura IV-7: Variación con la profundidad de la composición mineralógica y propiedades químicas de las muestras estudiadas en laboratorio.....	125
Figura IV-8: Esquema de resultados de conductividad térmica de las muestras en función del tipo de sonda y posición en la probeta.....	127
Figura IV-9: Perfil estratigráfico de la perforación y resultados de conductividad térmica de las muestras seleccionadas para condiciones de saturación $s_r=0\%$ a $S_r = 100\%$	129
Figura IV-10: Perfil estratigráfico de la perforación y resultados de conductividad térmica composición química, mineralógica y granulométrica.	130
Figura IV-11: Diseño del sistema de aplicación de cargas térmicas en el pilote	137
Figura IV-12: Esquema de potencia a inyectar durante el primer ensayo térmico	139
Figura IV-13: Perfil diario de potencia a inyectar durante el segundo ensayo térmico.....	140
Figura IV-14: Esquema de potencia a inyectar durante los 15 días de duración del segundo ensayo térmico....	141
Figura IV-15: Esquema de montaje de los distintos elementos que conforman el sistema de aplicación de la carga mecánica	143
Figura IV-16: Esquema del ensayo de carga estática	144
Figura IV-17: Esquema de carga aplicada durante el segundo ensayo de carga estática.....	144
Figura IV-18: Esquema pilote empleado.HCK-350	145
Figura IV-19: Croquis de armado.....	146
Figura IV-20: Juntas empleadas para la fabricación del pilote HCK-350	147
Figura IV-21: Diseño del azuche y zuncho.....	147
Figura IV-22: Azuche ciego y zuncho de refuerzo.....	148
Figura IV-23: Disposición de la instrumentación en el interior del pilote (Ex) extensómetros de cuerda vibrante, (Fo): Sensores de fibra óptica, (Bd): Bandas de deformación o galgas extensométricas.....	149
Figura IV-24: Extensómetro de cuerda vibrante, conectores y cableado	150
Figura IV-25: Sensores dentro de un baño termostático de suelos.....	152
Figura IV-26: Cuadro resumen tipo de calibración de los sensores os3600	154
Figura IV-27: Sensor de fibra óptica embebible en hormigón con discos de montaje, conector y cápsula de protección.	154
Figura IV-28: Instrumentación dispuesta en el pilote	155
Figura IV-29: Llegada del cableado a los cajetines de las juntas y salida por el frontal de la misma.....	155
Figura IV-30: Izda.) Cableado alojado en cajetín de junta inferior. Dcha.) Cableado alojado en cajetín de junta superior.....	156
Figura IV-31: Cableado en los cajetines superiores de salida.....	156
Figura IV-32: Junttan PM-20 con martillo de 7 t.....	157
Figura IV-33: Izado del pilote, Figura IV-34: Presentación y nivelado	158

Figura IV-35: Proceso de hinca	Figura IV-36: Hinca del primer tramo finalizada	158
Figura IV-37: Apertura del cajetín inferior del pilote y extracción del cableado de espera procedente del tramo inferior		159
Figura IV-38: Conectores de extensómetros y fibra óptica. Manguito protector para conexión de fibra óptica		159
Figura IV-39: Izado del segundo tramo de pilote y colocación en posición para la realización de las conexiones		160
Figura IV-40: Apertura del cajetín superior y realización de las conexiones		160
Figura IV-41: Izda. y centro. Los cajetines de las juntas donde se alojan todas las conexiones se cierran y se protegen con mortero de cemento. A la dcha. colocación de los pasadores de unión		161
Figura IV-42: Finalización de la hinca		161
Figura IV-43: Apertura de los cajetines superiores y extracción del cableado		162
Figura IV-44: Izda. Comprobación de la instrumentación tradicional. Dcha. Interrogador y PC para comprobación de la fibra óptica		162
Figura IV-45: Analizador Electrónico de Hinca de Pilotes (Árcos Álvarez y De Juan García 2007)		163
Figura IV-46: Instalación en el pilote de acelerómetros y extensómetros para realizar el ensayo P.D.A.		163
Figura IV-47: Realización del ensayo de carga dinámica (P.D.A.)		164
Figura IV-48: Compresiones (rojo) y tracciones (azul) medidas durante la prueba		166
Figura IV-49: Energía transferida al pilote (rojo) y desplazamiento teórico final (azul)		167
Figura IV-50: Compresión en la punta del pilote (azul) y capacidad portante estática estimada (rojo)		168
Figura IV-51: Resultados método CAPWAP (Árcos Álvarez y De Juan García 2007)		170
Figura IV-52: Resultados a través del método CAPWAP del pilote ensayado		170
Figura IV-53: Simulación de prueba de carga estática tres horas después de la hinca		171
Figura IV-54: Simulación de prueba de carga estática diecinueve horas después de la hinca		171
Figura IV-55: Introducción de la sonda en el interior del pilote		172
Figura IV-56: Conexionado mediante codos a la tubería horizontal		173
Figura IV-57: Mortero durante proceso de amasado		174
Figura IV-58: Inyección del mortero en el interior del pilote		175
Figura IV-59: Bastidor de reacción junto con sus patas		176
Figura IV-60: Castillete o sufridera		176
Figura IV-61: Célula de carga y gato hidráulico		177
Figura IV-62: Disposición en planta de los anclajes. Croquis de replanteo		178
Figura IV-63: Inicio de los trabajos de perforación		179
Figura IV-64: Anclajes finalizados. Introducción de la barra y centrado de la misma en la perforación		179
Figura IV-65: Encachado de grava sobre geotextil		180
Figura IV-66: Montaje del castillete		180
Figura IV-67: Escalones de carga en los anclajes		182
Figura IV-68: Instalación del bastidor		183
Figura IV-69: Centrado del bastidor sobre las barras		183
Figura IV-70: Nivelación del bastidor. Colocación de las patas y placas de reparto		184
Figura IV-71: "Rabillo" de barras sobre bastidor. Tuerca, contratuerca y placa		184
Figura IV-72: Estado final de la instalación		185
Figura IV-73: Detalle de los elementos de la instalación térmica		186
Figura IV-74: Armario con los elementos de control de la instalación		187
Figura IV-75: Conexionado con el pilote geotérmico. Conexión en Y y sondas de cabecera		187
Figura IV-76: Vista en planta de la distribución de sensores LVDT		188
Figura IV-77: Vista en planta de la distribución de los flexímetros durante primer ensayo de carga estática		188
Figura IV-78: LVDT y Flexímetros dispuestos en la cabeza del pilote		189
Figura IV-79: Célula de carga situada entre el bastidor y el gato hidráulico		189
Figura V-1. Ley de Fourier		197
Figura V-2. Identificación de los 6 momentos estudiados a lo largo del ensayo C		200
Figura V-3. Modelo del pilote axisimétrico y terreno con los estratos definidos		203
Figura V-4. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C0		204
Figura V-5. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C0		204
Figura V-6. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento Ca		205
Figura V-7. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C0		205
Figura V-8. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento Cb		206
Figura V-9. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento Cb		206
Figura V-10. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento Cc		207
Figura V-11. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento Cc		207
Figura V-12. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento Cd		208
Figura V-13. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento Cd		208

Figura V-14. Modelo de distribución de temperaturas correspondiente al momento C_e	209
Figura V-15. Variación de la temperatura en el terreno en función de la distancia al pilote, a dos profundidades diferentes, en el momento C_e	209
Figura V-16. Influencia térmica del pilote sobre el terreno a 4 m de profundidad	210
Figura V-17. Influencia térmica del pilote sobre el terreno a 16 m de profundidad	211
Figura V-18. Resistencia térmica del pilote (R_b) y del terreno (R_{terreno})	212
Figura V-19. Registro de datos de la instalación térmica durante los dos ensayos	217
Figura V-20. Aproximación de la temperatura media en el pilote a la ecuación de una recta	217
Figura V-21. Perfil térmico del terreno a 40 m de distancia del pilote en el momento C_0	221
Figura VI-1. a) Deformación observada (a); b) Deformación térmica libre (c); c) Deformación no desarrollada (d)	229
Figura VI-2. Sistema de aplicación de cargas y detalle de la célula de carga de 120 t	232
Figura VI-3. Secuencia de escalones de carga del ensayo A	233
Figura VI-4. Carga medida en cabeza de pilote durante el ensayo A	233
Figura VI-5. Disposición de los sensores en la cabeza del pilote durante el ensayo A	234
Figura VI-6. Movimientos verticales medidos por el flexímetro sobre el bastidor (FV 9)	235
Figura VI-7. Movimientos verticales registrados durante el ensayo A (LVDT's)	236
Figura VI-8. Movimientos verticales registrados durante el ensayo A (flexímetros)	236
Figura VI-9. Movimientos horizontales en cabeza durante el ensayo A (LVDT's)	237
Figura VI-10. Movimientos horizontales en cabeza durante el ensayo A (flexímetros)	237
Figura VI-11. Variación de la deformación con la profundidad en el interior del pilote durante los cinco ciclos del ensayo A. CC: escalón de carga; CD: escalón de descarga	238
Figura VI-12. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 1	239
Figura VI-13. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 2	239
Figura VI-14. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 3	240
Figura VI-15. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 4	240
Figura VI-16. Variación de la deformación con la profundidad. Ensayo A, ciclo 5	240
Figura VI-17. Evolución de las tensiones en el interior del pilote durante el ensayo A.	241
Figura VI-18. Evolución del perfil carga con la profundidad durante el ensayo A.	242
Figura VI-19. Secuencia de escalones de carga del ensayo B	243
Figura VI-20. Carga medida en cabeza de pilote durante el ensayo B	244
Figura VI-21. Identificación de LVDT's en la cabeza del pilote. Ensayo B	245
Figura VI-22. Movimientos verticales de cabeza medidos mediante LVDT's. Ensayo B	245
Figura VI-23. Movimientos horizontales en cabeza medidos mediante LVDT's. Ensayo B	246
Figura VI-24. Evolución de las deformaciones en el interior del pilote. Ensayo B (Extensómetros)	247
Figura VI-25. Evolución de las deformaciones en el interior del pilote. Ensayo B	247
Figura VI-26. Evolución de las curvas tensión-profundidad a lo largo del ensayo B (Extensómetros)	248
Figura VI-27. Evolución de las curvas tensión-profundidad a lo largo del ensayo B	248
Figura VI-28. Evolución de las curvas carga-profundidad a lo largo del ensayo B (extensómetros)	250
Figura VI-29. Evolución de las curvas carga-profundidad a lo largo del ensayo B	250
Figura VI-30. Puntos estudiados en el ensayo C.	252
Figura VI-31. Variación de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo C	253
Figura VI-32. Disposición de los sensores en cabeza durante el ensayo C	254
Figura VI-33. Movimientos verticales durante el ensayo C	255
Figura VI-34. Movimientos horizontales durante el ensayo C	256
Figura VI-35. Evolución de la deformación observada durante el ensayo C	258
Figura VI-36. Evolución de la deformación no desarrollada durante el ensayo C	259
Figura VI-37. Evolución de las curvas de variación de la tensión de origen térmico durante el ensayo C (extensómetros)	262
Figura VI-38. Evolución de las curvas de variación de la tensión de origen térmico durante el ensayo C (fibra óptica)	262
Figura VI-39. Evolución de las curvas de tensión total a lo largo del ensayo C (extensómetros)	263
Figura VI-40. Evolución de las curvas de tensión total a lo largo del ensayo C (fibra óptica)	264
Figura VI-41. Evolución del perfil de carga en el interior del pilote durante el ensayo C (extensómetros)	265
Figura VI-42. Evolución del perfil de carga en el interior del pilote durante el ensayo C	266
Figura VI-43. Evolución de las curvas de carga total a lo largo del ensayo C (extensómetros)	267
Figura VI-44. Evolución de las curvas de carga total a lo largo del ensayo C (fibra óptica)	267
Figura VI-45. Perfil diario del ensayo E. Puntos de toma de datos en un ciclo.	269
Figura VI-46. Ensayo E completo	269
Figura VI-47. Puntos estudiados del ciclo 2	270
Figura VI-48. Variación de la temperatura con la profundidad en el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)	271
Figura VI-49. Esquema de disposición de los sensores en planta durante el ensayo E.	271
Figura VI-50. Movimientos verticales durante el ciclo 2 del ensayo E	272
Figura VI-51. Movimientos horizontales durante el ciclo 2 del ensayo E	273
Figura VI-52. Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)	274

Figura VI-53: Evolución de la deformación no desarrollada con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica).....	275
Figura VI-54: Evolución del incremento de tensiones térmicas con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (extensómetros).....	277
Figura VI-55: Evolución del incremento de tensiones térmicas con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica).....	277
Figura VI-56: Evolución del perfil de tensiones totales durante el ciclo 2 del ensayo E.....	279
Figura VI-57: Evolución del perfil de tensiones totales durante el ciclo 2 del ensayo E.....	279
Figura VI-58: Evolución del incremento del esfuerzo axil de origen térmico con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros).....	281
Figura VI-59: Evolución del incremento del esfuerzo axil de origen térmico con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica).....	281
Figura VI-60: Evolución del incremento de carga total con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros).....	282
Figura VI-61: Evolución del incremento de carga total con la profundidad durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica).....	282
Figura VI-62: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto a.....	283
Figura VI-63: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto b.....	284
Figura VI-64: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto c.....	284
Figura VI-65: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto d.....	285
Figura VI-66: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto e.....	285
Figura VI-67: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto f.....	286
Figura VI-68: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto g.....	286
Figura VI-69: Evolución de temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E en el punto h.....	287
Figura VI-70: Esquema de disposición de los sensores en cabeza durante el ensayo E.....	287
Figura VI-71: Movimientos verticales durante el ensayo E.....	291
Figura VI-72: Movimientos horizontales durante el ensayo E.....	291
Figura VI-73: Evolución de la deformación observada en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	293
Figura VI-74: Evolución de la deformación observada en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	293
Figura VI-75: Evolución de la deformación observada en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	294
Figura VI-76: Evolución de la deformación observada en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	294
Figura VI-77: Evolución de la deformación observada en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	295
Figura VI-78: Evolución de la deformación observada en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	295
Figura VI-79: Evolución de la deformación observada en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	296
Figura VI-80: Evolución de la deformación observada en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	296
Figura VI-81: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	297
Figura VI-82: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	297
Figura VI-83: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	298
Figura VI-84: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	298
Figura VI-85: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	299
Figura VI-86: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	299
Figura VI-87: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	300
Figura VI-88: Evolución de la deformación no desarrollada en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	300
Figura VI-89: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	301
Figura VI-90: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	302
Figura VI-91: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros).....	302
Figura VI-92: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto b, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	303

Figura VI-93: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	303
Figura VI-94: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto c, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	304
Figura VI-95: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	304
Figura VI-96: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto d, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	305
Figura VI-97: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	305
Figura VI-98: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto e, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	306
Figura VI-99: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	306
Figura VI-100: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto f, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	307
Figura VI-101: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	307
Figura VI-102: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto g, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	308
Figura VI-103: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	308
Figura VI-104: Evolución de las curvas de incremento de tensión térmica en el punto h, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	309
Figura VI-105: Evolución de las curvas de tensión total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	310
Figura VI-106: Evolución de las curvas de tensión total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	310
Figura VI-107: Evolución de las curvas de incremento de carga térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	311
Figura VI-108: Evolución de las curvas de incremento de carga térmica en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	311
Figura VI-109: Evolución de las curvas de carga total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (extensómetros)	312
Figura VI-110: Evolución de las curvas de carga total en el punto a, a lo largo de los 15 ciclos del ensayo E (fibra óptica)	312
Figura VII-1. Movimientos verticales registrados por LVDT's y flexímetros durante el ensayo A.....	317
Figura VII-2. Movimientos horizontales registrados por LVDT's y flexímetros durante el ensayo A.....	317
Figura VII-3: Variación de la deformación con la profundidad en el ensayo A (extensómetros)	318
Figura VII-4: Movimientos en cabeza y deformación vertical del pilote durante el ensayo A	320
Figura VII-5: Variación de la tensión con la profundidad en el ensayo A (extensómetros)	321
Figura VII-6: Variación de la carga con la profundidad en el ensayo A (extensómetros)	322
Figura VII-7. Evolución de la carga en la punta del pilote en el ensayo A.....	323
Figura VII-8. Correlación de parámetros en el ensayo A	325
Figura VII-9. Relación entre la carga en punta y el asiento en punta. Ensayo A.....	326
Figura VII-10. Carga en cabeza vs asiento en cabeza a lo largo del ensayo A	327
Figura VII-11. Carga en punta vs asiento en punta a lo largo del ensayo A	327
Figura VII-12. Tensión transmitida al terreno por fuste (kN/m ²) en el ensayo A (extensómetros).	329
Figura VII-13. Movimientos verticales y horizontales durante el ensayo B	333
Figura VII-14 : Variación de la deformación con la profundidad en el ensayo B (extensómetros)	334
Figura VII-15 : Variación de la deformación con la profundidad en el ensayo B (fibra óptica)	334
Figura VII-16: Movimientos en cabeza (LVDT) y deformación vertical del pilote durante el ensayo B.....	336
Figura VII-17: Evolución de la carga en la punta del pilote en el ensayo B.....	338
Figura VII-18: Tensión transmitida al terreno por fuste durante el ensayo B (extensómetros).....	341
Figura VII-19. Tensión transmitida al terreno por fuste durante el ensayo B (Fibra óptica).	341
Figura VII-20. Relación entre la resistencia por fuste (CAPWAP) y la tensión tangencial transmitida por fuste al terreno durante los ensayos A y B (extensómetros)	343
Figura VII-21. Relación entre la resistencia por fuste (CAPWAP) y la tensión tangencial transmitida por fuste al terreno durante el ensayo B (fibra óptica).....	343
Figura VII-22: Puntos estudiados en el ensayo C.	345
Figura VII-23. Variación de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo C.....	347
Figura VII-24. Incremento de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo C.....	347
Figura VII-25: Evolución de la deformación libre durante el ensayo C (fibra óptica)	349
Figura VII-26: Evolución de la temperatura durante el ensayo C (Fibra óptica)	349
Figura VII-27. Movimientos detectados en la cabeza del pilote durante el ensayo C	350
Figura VII-28: Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ensayo C (extensómetros).....	351

Figura VII-29. Movimientos en cabeza (LVDT's) y deformación vertical del pilote (compresiones signo negativo) en cabeza durante el ensayo C	353
Figura VII-30. Evolución de los perfiles de tensión de origen térmico durante el ensayo C.....	354
Figura VII-31. Evolución de las curvas de tensión total a lo largo del ensayo C	356
Figura VII-32: Evolución del perfil de carga total (mecánica más térmica) en el interior del pilote durante el ensayo C	357
Figura VII-33: Variación de la carga térmica en la punta del pilote durante el ensayo C.	359
Figura VII-34: Variación de la carga total en el sensor de fibra óptica (16 m de profundidad) del pilote durante el ensayo C.....	360
Figura VII-35: Tensión tangencial de origen térmico generada entre fuste y terreno durante el ensayo C (extensómetros).....	363
Figura VII-36. Tensión tangencial de origen térmico generada entre fuste y terreno durante el ensayo C (fibra óptica).....	363
Figura VII-37: Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante el ensayo C (extensómetros)	365
Figura VII-38. Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante el ensayo C (Fibra óptica).....	365
Figura VII-39: Tensión tangencial total entre fuste y terreno (kN/m ²) durante los ciclos de calentamiento: a) Ensayo de Londres, $\Delta T=29,4$ °C; b) Ensayo de Lausana, $\Delta T=20,9$ °C (Amaya, y otros 2012); c) Ensayo C, momento Cb: $\Delta T=15$ °C.....	366
Figura VII-40. Comparación entre la resistencia por fuste del pilote (CAPWAP) y las tensiones tangenciales totales entre fuste y terreno durante el momento Cb del ensayo C.	370
Figura VII-41. Detalle de los puntos estudiados del ciclo 2.....	372
Figura VII-42. Incremento de la temperatura con la profundidad a lo largo del ciclo 2 del ensayo E	372
Figura VII-43. Movimientos detectados en la cabeza del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E.....	373
Figura VII-44. Evolución de la deformación observada con la profundidad en el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros).....	375
Figura VII-45. Movimientos en cabeza (LVDT's) y deformación vertical del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E.	376
Figura VII-46. Evolución del perfil de tensiones térmicas en el interior del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E (Extensómetros).....	378
Figura VII-47. Evolución del perfil de tensiones térmicas en el interior del pilote durante el ciclo 2 del ensayo E (Fibra óptica).....	378
Figura VII-48. Evolución de los perfiles de carga total durante el ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)	380
Figura VII-49. Evolución de los perfiles de carga total durante el ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica).....	380
Figura VII-50: Evolución de la carga térmica en la punta del pilote a lo largo del ciclo 2 del ensayo E	381
Figura VII-51: Evolución de la carga total en la punta del pilote a lo largo del ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)	382
Figura VII-52. Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante ciclo 2 del ensayo E (extensómetros)	384
Figura VII-53. Tensión tangencial total entre fuste y terreno durante ciclo 2 del ensayo E (fibra óptica)	384
Figura VII-54. Ensayo E completo.....	385
Figura VII-55. Incremento de la temperatura con la profundidad a lo largo del ensayo E, punto Ed.....	386
Figura VII-56. Movimientos durante el ensayo E.....	387
Figura VII-57. Evolución de la deformación observada en el interior del pilote durante el ensayo E (Extensómetros).....	388
Figura VII-58. Movimiento en cabeza y deformación vertical del pilote durante el momento Ee del ensayo E.	389
Figura VII-59. Evolución del incremento de tensión térmica en el interior del pilote en el momento Ee del ensayo E (Fibra óptica)	390
Figura VII-60. Evolución de la carga total con la profundidad en el momento Ee durante el ensayo E (fibra óptica)	391
Figura VII-61. Evolución de la carga térmica en la punta del pilote a lo largo del ensayo E	393
Figura VII-62. Evolución de la carga total en la punta del pilote a lo largo del ensayo E	394
Figura VII-63. Tensión total transmitida al terreno por fuste (kN/m ²) en el momento "e" de todos los ciclos del ensayo E (extensómetros).....	396
Figura VII-64. Tensión total transmitida al terreno por fuste (kN/m ²) en el momento "e" de todos los ciclos del ensayo E (fibra óptica).....	396

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II-1: Valores de γ_R propuestos en el CTE (2008)	36
Tabla II-2: Coeficientes parciales propuestos en el CTE (2008)	37
Tabla II-3: Coeficientes parciales γ_R aplicables a las resistencias de cálculo de pilotes hincados	38
Tabla II-4: Coeficientes de seguridad frente al hundimiento de pilotes (ROM-05)	39
Tabla II-5: Valores de coeficientes de seguridad para las combinaciones de acciones (GCOC)	40
Tabla II-6: Tipos de yacimientos geotérmicos convencionales	42
Tabla II-7: Túneles suizos a través de los Alpes con aprovechamiento geotérmico	53
Tabla II-8: Parámetros de diseño de cimentaciones termo-activas, además de las condiciones climáticas (Adam & Markiewicz, 2003; Katzembach et al. 2007)	59
Tabla IV-1: Ensayos de laboratorio realizados en el CEDEX	121
Tabla IV-2: Datos de granulometría, plasticidad y peso específico obtenidos en laboratorio	121
Tabla IV-3: Composición mineralógica y propiedades químicas de las muestras estudiadas en laboratorio	124
Tabla IV-4: Parámetros de identificación y clasificación geotécnica de las muestras utilizadas para la determinación de la conductividad térmica en laboratorio	126
Tabla IV-5: Resumen de resultados de conductividad térmica según la posición y tipo de sonda. En la parte inferior se muestran los valores estadísticos.	128
Tabla IV-6: Valores de conductividad térmica de las muestras ensayadas	129
Tabla IV-7: Propiedades geotécnicas y geotérmicas de los niveles atravesados por el pilote	131
Tabla IV-8. Datos de calibración alineación 1	153
Tabla IV-9. Datos de calibración alineación 2	153
Tabla IV-10: Características del mortero FCK 5025	174
Tabla IV-11: Características de los anclajes	178
Tabla IV-12: Características de las barras roscadas	181
Tabla IV-13: Escalones de carga en los anclajes	181
Tabla V-1. Propiedades de los materiales introducidas en el modelo	201
Tabla V-2: Características de los dos ensayos térmicos	216
Tabla V-3: Datos de conductividad térmica de los niveles identificados y conductividad térmica media calculada	219
Tabla V-4: Datos térmicos de los momentos Ca, Cb y Cc estudiados para la determinación de Rb	222
Tabla V-1. Criterio de signos seguido en esta tesis	230
Tabla V-2: Condiciones experimentales del ensayo C	251
Tabla V-3: Momentos específicos identificados durante el ensayo C	252
Tabla V-4. Resumen de movimientos experimentados en cabeza por el pilote (mm)	254
Tabla V-5. Secuencia térmica de un ciclo diario del ensayo E	268
Tabla V-6. Movimientos medidos en cabeza en el ciclo 2 del ensayo E (mm)	272
Tabla V-7. Resumen de movimientos experimentados en cabeza durante el ensayo E (mm)	288
Tabla VI-1: Datos obtenidos durante el ensayo A	324
Tabla VI-2. Valores de tensión media transmitida por fuste en algunos momentos del ensayo A.	328
Tabla VI-3. Determinación de la resistencia por fuste, por punta y total mediante métodos analíticos	330
Tabla VI-4. Determinación de la resistencia por fuste, por punta y total mediante el método CAPWAP	331
Tabla VI-5. Comparación entre resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensión transmitida por fuste del pilote al terreno (ensayo A)	332
Tabla VI-6. Comportamiento del pilote respecto a su resistencia por punta y por fuste	332
Tabla VI-7. Comparación movimientos en cabeza, acortamiento del pilote y asiento de la punta obtenidos durante ensayo A y B	336
Tabla VI-8. Tensión tangencial entre terreno y fuste durante el ensayo B (extensómetros), en kN/m ²	339
Tabla VI-9. Tensión tangencial entre terreno y fuste durante el ensayo B (fibra óptica), en kN/m ²	339
Tabla VI-10. Comparación entre resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensión transmitida por fuste del pilote al terreno durante los ensayos A y B (extensómetros)	342
Tabla VI-11. Comparación entre resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensión transmitida por fuste del pilote al terreno durante el ensayo B (fibra óptica)	342
Tabla VI-12. Capacidad del pilote (método CAPWAP) y cargas por punta y por fuste durante los ensayos A y B	344
Tabla VI-13. Momentos específicos identificados durante el ensayo C	346
Tabla VI-14. Temperatura ambiente y temperatura en los sensores de fibra óptica. Ensayo C	348
Tabla VI-15. Comparación movimientos en cabeza, acortamiento del pilote y asiento de la punta obtenidos durante ensayo A y B	353
Tabla VI-16. Tensión tangencial de origen térmico entre fuste y terreno durante el ensayo C	361
Tabla VI-17. Tensiones totales tangenciales de origen térmico entre fuste y terreno durante el ensayo C (kN/m ²)	364

Tabla VI-18. Carga total transmitida al terreno por fuste y por punta en los ensayos A, B y C. Comparación con la capacidad portante del pilote, su resistencia por punta y por fuste (método CAPWAP).....	368
Tabla VI-19. Resistencia por fuste (método CAPWAP) y tensiones tangenciales entre fuste y terreno en el momento Cb del ensayo C.	370
Tabla VI-20. Secuencia térmica de un ciclo diario del ensayo E.....	371
Tabla VI-21. Comparación movimientos en cabeza, acortamiento del pilote y asiento de la punta obtenidos durante los ensayos A, B, C y E	376
Tabla VI-22. Máximos valores de movimiento en cabeza y dilatación del pilote durante el ensayo E. Comparación con el ensayo C	390
Tabla VI-23. Carga total, por fuste y por punta, en los ensayos A, B, C, ciclo 2 del ensayo E (puntoE2e) y ciclo 12 del ensayo E (punto E12e). Comparación con la capacidad portante del pilote, su resistencia por punta y por fuste (método CAPWAP)	397
Tabla VI-24. Máximo esfuerzo axil registrado durante los ensayos C y E y profundidad correspondiente.	399