



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IMPLEMENTACIÓN DE PILAS DE ENTIBACIÓN Y SUS ANCLAJES PARA EL APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MARIO ORLANDO MUÑOZ LORCA

PROFESOR GUÍA:
MAURICIO TOLEDO VILLEGAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS
GABRIEL RODRIGUEZ JAQUE

SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2011

"IMPLEMENTACIÓN DE PILAS DE ENTIBACIÓN Y SUS ANCLAJES PARA EL APROVECHAMIENTO GEOTÉRMICO"

El presente estudio introdujo el concepto de aprovechamiento geotérmico destinado a calefacción, ya existente y es aplicado en varios países del mundo, como Alemania, Suecia Bélgica, Suiza, Arabia Saudita, entre otros, adaptando su aplicación a la posible oferta existente en Chile. La mayoría de estas aplicaciones alrededor del mundo corresponden a aprovechamientos geotérmicos del tipo pozo geotérmico (borehole) o pilas energéticas de fundación (energy piles), sin embargo, la presente investigación demuestra que el concepto de aprovechamiento geotérmico es factible y aplicable en pilas de entibación y sus anclajes mediante una implementación de un circuito de cañerías flexibles de manera solidaria a la armadura.

La investigación se realizó en dos pilas de entibación y sus respectivos anclajes postensados inyectados, que forman parte de la etapa de entibación del proyecto Bicentenario Beauchef Poniente. Ésta consistió en un aprovechamiento geotérmico mediante la instalación de un circuito de cañerías flexibles de manera solidaria a la armadura de las pilas y los anclajes. Las pilas de entibación son de aproximadamente 30 metros de longitud y de un diámetro exterior de 100 cm. Existen tres niveles de anclaje, con una longitud libre que varía entre 16 m y 6 m, y una longitud de bulbo que varía entre 5.5 m y 3.7 m, dependiendo de su ubicación en la entibación y del nivel de anclaje en que se encuentren.

En la investigación se desarrollaron específicamente los siguientes tres conceptos:

- Metodología Constructiva (MC): Se realizó un estudio sobre las metodologías constructivas involucradas en la implementación de las pilas de entibación y sus anclajes. Finalmente se propone una metodología que logra complementar, de forma eficiente, la construcción original y propia de las pilas de entibación y sus anclajes, con la implementación de éstas.
- Balance Térmico (BT): Se verificó que la temperatura del suelo es favorable para la implementación de sistemas geotérmicos. Además se calcularon las propiedades térmicas del suelo, conductividad y resistencia térmica efectiva, mediante un diseño y armado de un equipo para la aplicación de un test de respuesta térmica TRT.
- Análisis de costos (AC): Se identificaron los costos asociados a la implementación de las pilas de entibación y los respectivos anclajes, los que fueron comparados con los costos originales de una pila de entibación sin implementar.

Los resultados de la investigación indicaron que la implementación de pilas de entibación y anclajes mediante un sistema geotérmico es factible bajo una metodología propuesta, generando un aumento en los costos de construcción de las pilas de entibación del 17%. Además las condiciones y propiedades del suelo son favorables para la instalación de sistemas geotérmicos, donde se obtuvo una temperatura promedio del suelo a baja profundidad de 15,3°C, una conductividad térmica efectiva de 2,536 W/m°C, y una resistencia térmica efectiva de 0,293 m°C/W.

AGRADECIMIENTOS

“.. acerca del talento, no sirve para nada si no va acompañado de determinación, planificación, disciplina y perseverancia. El talento es efímero, la determinación, eterna.”

Felipe Cubillos

Las palabras antes citadas reflejan lo que hoy siento. El trabajo constante, metódico y ordenado, fueron las principales armas que hoy me llevan a obtener este éxito en mi vida.

Este trabajo va dedicado a todas las personas que participaron de forma directa o indirecta en su confección. Especialmente agradezco a Dios por darme esta oportunidad y ayudarme en los momentos difíciles a encontrar el camino y la forma correcta de enfrentarlos. Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional y sus palabras precisas en los momentos adecuados.

Si bien son muchas las personas que dedicaron algún minuto de su tiempo para ayudarme en la investigación, agradezco de manera especial a Omar González M. y Mario Carrillos V., cuerpo docente a cargo del laboratorio MECESUP de nuestra Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCION	1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2 DETALLES DE UNA PILA DE ENTIBACIÓN Y SUS ANCLAJES	4
1.2.1 Descripción general	4
1.2.2 Diagrama	5
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 Objetivos generales	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 DESARROLLO DEL TRABAJO DE TÍTULO	9
2. METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA (MC)	10
2.1 METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA TEÓRICA (MCT).....	14
2.1.1 MCT para una PE.....	14
2.1.2 MCT para los anclajes.....	15
2.2 METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE DISEÑO (MCD).....	17
2.2.1 Metodología constructiva de diseño (MCD) para la implementación de PE	17
2.2.2 MCD para la implementación de anclajes.....	17
2.3 METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA APLICADA (MCA) EN LA IMPLEMENTACIÓN DE PE Y ANCLAJES.	18
2.3.1 MCA para la implementación de las PE.	18
2.3.2 MCA para la implementación de los anclajes.	30
2.4 METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA PROPUESTA (MCP) PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS PE Y LOS ANCLAJES.	35
2.4.1 Descripción de las nuevas tareas que fueron necesarias integrar e inconvenientes que se presentaron	35
2.4.2 MCP para la implementación de las PE.....	40
2.4.3 MCP para la implementación de anclajes.....	46
2.5 ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE EJECUCIÓN DE LAS DISTINTAS MC DISCUTIDAS.	54
3. BALANCE TERMICO (BT)	62
3.1 PERFIL TÉRMICO DE UNA PE.....	65
3.1.1 Implementación de las PE mediante sensores térmicos	65
3.1.2 Resultados del perfil térmico de una PE.....	69
3.2 PERFIL TÉRMICO DEL SUELO.....	71
3.2.1 Implementación para perfil térmico del suelo.....	71
3.2.2 Resultados del perfil térmico del suelo.....	72
3.3 TEST DE RESPUESTA TÉRMICA.....	89

3.3.1	Funcionamiento del test de respuesta térmica.	90
3.3.2	Resultados del test de respuesta térmica (TRT)	94
4.	ANÁLISIS DE COSTOS (AC)	111
4.1	COSTOS GENERADOS POR LA IMPLEMENTACIÓN (MCA).....	114
4.1.1	Costos generados por la implementación de las PE (según MCA).	114
4.1.2	Costos generados por la implementación de los anclajes (según MCA).	115
4.2	COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN ASOCIADOS A LA MCP	118
4.2.1	Costos de implementación asociados a la MCP para la implementación de las PE.	118
4.2.2	Costos de implementación asociados a la MCP para los anclajes.	119
4.3	COMPARACIÓN DE COSTOS ASOCIADOS A LA MCA Y MCP SELECCIONADA.	123
5.	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES	125
6.	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Valores de temperatura media para Santiago - estación Quinta Normal (°C) (NCh 1079.Of.2008).....	2
Tabla 2.1 Tiempos de ejecución en cada MC estudiada.....	56
Tabla 2.2 Tiempos de ejecución para cada MC estudiada para la implementación de los anclajes.....	59
Tabla 3.1 Distribución de los LM35DZ en PE 101 y PE 100.	66
Tabla 3.2 Datos perfil térmico de la PE101 y PE100 día 02/09/2011	69
Tabla 3.3 Distribución de sensores térmicos en el suelo.	71
Tabla 3.4 Registro de datos N°1 de la temperatura del suelo.....	73
Tabla 3.5 Registro de datos N°2 de la temperatura del suelo.....	75
Tabla 3.6 Registro de datos N°3 de la temperatura del suelo.....	77
Tabla 3.7 Registro de datos N°4 de la temperatura del suelo	79
Tabla 3.8 Registro de datos N°5 de la temperatura del suelo	81
Tabla 3.9 Registro de datos N°6 de la temperatura del suelo	83
Tabla 3.10 Registro de datos N°7 de la temperatura del suelo	85
Tabla 3.11 Resumen de los registros de temperatura del suelo.	87
Tabla 3.12 Resumen de conductividad y resistencia térmica efectiva de los ensayos	110
Tabla 4.1 Precios Unitarios de las PE y anclajes sin implementar (Polotes Terratest S.A. 2009).....	112
Tabla 4.2 Precio total de una PE y sus anclajes sin implementar.	112
Tabla 4.3 Costos generados por la implementación según MCA para la PE 101 (vertical).	115
Tabla 4.4 Costos generados por la implementación según MCA para la PE 100 (helicoidal).	115
Tabla 4.5 Costos generados por la implementación de la primera línea de anclaje (L1) según MCA.....	116
Tabla 4.6 Costos generados por la implementación de la segunda línea de anclaje (L2) según MCA.....	116
Tabla 4.7 Costos generados por la implementación de la tercera línea de anclaje (L3) según MCA.....	116
Tabla 4.8 Costo total generado por la implementación para cada línea de anclaje en las PE101 y PE100.....	117
Tabla 4.9 Resumen de costos totales generados por la implementación de PE y anclajes.....	117
Tabla 4.10 Costos totales generados por la implementación para cada PE con sus respectivas tres líneas de anclaje.	117

Tabla 4.11 Costos de implementación asociados a la MCP para una PE en forma vertical (alternativa 1).	119
Tabla 4.12 Costos de implementación asociados a la MCP para una PE en forma helicoidal y vertical en zona de anclajes (alternativa 2).	119
Tabla 4.13 Costos de implementación asociados a la MCP utilizando hombro de hormigón armado (alternativa 1).	120
Tabla 4.14 Costos de implementación asociados a la MCP utilizando hombro de acero (alternativa 2).	121
Tabla 4.15 Costos de implementación asociados a la MCP sin hombro de anclaje (alternativa 3).	122
Tabla 4.16 Costos totales de implementación de los anclajes por alternativa propuesta.	122
Tabla 4.17 Resumen de los costos asociados a la implementación aplicada y de las alternativas propuestas seleccionadas.	123
Tabla 4.18 Comparación de costos de implementación según MCP seleccionada v/s costo propio de construcción de una PE y sus anclajes.	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Registro de T° para la ciudad de Temuco (Ramírez E. 2010)	1
Figura 1.2 Corte transversal de la PE.	5
Figura 1.3 Modelo de una pila de entibación y sus anclajes (Pilotes Terratest S.A. 2009)	7
Figura 2.1 Desarrollo del capítulo de MC	11
Figura 2.2 Etapas identificadas y desarrolladas para la implementación de las PE.....	12
Figura 2.3 Etapas identificadas y desarrolladas para la implementación de los anclajes.....	13
Figura 2.4 Esquema MC para PE. (Pilotes Terratest S.A. 2010),	14
Figura 2.5.a Perforación (1)	15
Figura 2.6 Excavación con pilotera.....	19
Figura 2.7 Circuito de cañerías flexibles colocado en la armadura de la PE101.	20
Figura 2.8 Numeración de las cañerías para la correcta conexión entre los cuerpos.	20
Figura 2.9 Asa soldada en cuerpo inferior de armadura.....	21
Figura 2.10 Detalle de las asas utilizadas (Terratest, 2009)	21
Figura 2.11 Maquina pilotera colocando cuerpo superior de la armadura de la PE101.	23
Figura 2.12 Hormigonado de la PE.	24
Figura 2.13 Pila de entibación implementada.....	25
Figura 2.14 PE implementada con circuito vertical (PE101).....	26
Figura 2.15 Fotografía de PE101 implementada con circuito vertical.....	27
Figura 2.16 PE implementada con circuito helicoidal (P100).	28
Figura 2.17 Fotografía de PE100 implementada con circuito helicoidal.....	29
Figura 2.18 Perforación para anclaje.....	30
Figura 2.19 Retorno en forma de "U" utilizado en el circuito de cañerías flexible de los anclajes.	31
Figura 2.20 Inyección de lechada en la perforación del anclaje.	32
Figura 2.21 Introducción del anclaje implementado.	33
Figura 2.22 Circuito de cañerías implementado en el anclaje.	34
Figura 2.23 Cabeza de anclaje utilizada en proyecto Beauchef Poniente.	38
Figura 2.24 Vista frontal viga de apoyo.....	39
Figura 2.25 Vista lateral viga de apoyo.....	39
Figura 2.26 Programación rítmica propuesta.	42
Figura 2.27 Diagrama de la MCP para la implementación de las PE.....	43
Figura 2.28 Tramo con distribución helicoidal.	43
Figura 2.29 Corte A-A (vista transversal) del tramo helicoidal.....	44
Figura 2.30 Esquema para la Implementación propuesta de las PE.....	45

Figura 2.31 Retorno utilizado en la implementación helicoidal.	46
Figura 2.32 Hombro de apoyo utilizado en anclaje de una Pila.....	48
Figura 2.33 Hombro de hombro de hormigón armado. (Pilotes Terratest S.A., 2010)	49
Figura 2.34 Apoyo de anclaje utilizado en esta ocasión como apoyo para la viga.	50
Figura 2.35 Esquemmatización propuesta para salida de cañerías mediante hombro de acero.	51
Figura 2.36 Esquemmatización frontal de propuesta sin hombro de anclaje.	52
Figura 2.37 Esquemmatización lateral de propuesta sin hombro.....	53
Figura 2.38 Diagrama de la MCP para la implementación de los anclajes.....	54
Figura 2.39 Carta Gantt para MCT, MCD y MCA para la implementación de PE.	55
Figura 2.40 Carta Gantt de la MCP para la implementación de PE.....	56
Figura 2.41 Tiempos de ejecución para las MCT, MCD, MCA en los anclajes.	58
Figura 2.42 Tiempos de ejecución de la MCP para la implementación de los anclajes.....	59
Figura 2.43 Detalle de estudio del giro de la armadura propuesto.	61
Figura 3.1 Curvas de temperatura del suelo en función de la profundidad (REHAU, 2008).	62
Figura 3.2 Esquema de desarrollo del capítulo de balance térmico.....	64
Figura 3.3 LM35DZ, sensores de temperatura fijados a la armadura.	65
Figura 3.4 LM35DZ.(Casa Royal, 2011)	65
Figura 3.5 Esquema de ubicación de los sensores térmicos en PE101.....	67
Figura 3.6 Esquema de ubicación de los sensores térmicos en PE100.....	68
Figura 3.7 Condición de superficie.....	70
Figura 3.8 Esquema de la ubicación de los sensores térmicos en el suelo.	72
Figura 3.9 Perfil térmico cable N°1, registro N°1.....	74
Figura 3.10 Perfil térmico cable N°2, registro N°1.....	74
Figura 3.11 Perfil térmico cable N°1, registro N°2.....	76
Figura 3.12 Perfil térmico cable N°2, registro N°2.....	76
Figura 3.13 Perfil térmico cable N°1, registro N°3.....	78
Figura 3.14 Perfil térmico cable N°2, registro N°3.....	78
Figura 3.15 Perfil térmico cable N°1, registro N°4.....	80
Figura 3.16 Perfil térmico cable N°2, registro N°4.....	80
Figura 3.17 Perfil térmico cable N°1, registro N°5.....	82
Figura 3.18 Perfil térmico cable N°2, registro N°5.....	82
Figura 3.19 Perfil térmico cable N°1, registro N°6.....	84
Figura 3.20 Perfil térmico cable N°2, registro N°6.....	84
Figura 3.21 Perfil térmico cable N°1, registro N°7.....	86
Figura 3.22 Perfil térmico cable N°1, registro N°7.....	86

Figura 3.23 Perfil térmico N°3 V/S N°6	88
Figura 3.24.a Esquema del funcionamiento del equipo móvil de TRT.	91
Figura 3.25 T°in, T°out y T°f registradas en ensayo 1	95
Figura 3.26 T°in, T°out y T°f en tramo de interés registradas en ensayo 1	96
Figura 3.27 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 1	97
Figura 3.28 Resistencia térmica efectiva - ensayo 1	98
Figura 3.29 T°in, T°out y T°f registradas en ensayo 2	99
Figura 3.30 T°in, T°out y T°f en tramo de interés registradas en ensayo 2	100
Figura 3.31 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 2.....	101
Figura 3.32 Resistencia térmica efectiva - Ensayo 2	102
Figura 3.33 T°in, T°out y T°f registradas en ensayo 3	103
Figura 3.34 T°in, T°out y T°f en tramos de interés registradas en ensayo 3	104
Figura 3.35 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 3.....	105
Figura 3.36 Resistencia térmica efectiva - Ensayo 3	106
Figura 3.37 T°in, T°out y T°f registradas en ensayo 4	107
Figura 3.38 T°in, T°out y T°f en tramos de interés registradas en ensayo 4	108
Figura 3.39 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 4.....	109
Figura 3.40 Resistencia térmica efectiva - Ensayo 4	110
Figura 4.1 Esquema desarrollo capítulo de análisis de costos.....	113

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes generales

Chile es un país donde la variedad de climas es muy amplia, abarcando casi todos los climas que existen en el mundo (NCh 1079.Of.2008), es por este motivo que tenemos la suerte de tener climas que nos ofrecen un confort, en términos de temperatura, ideal durante la mayor parte del año, y somos capaces de llevar una vida grata y cómoda sin necesidad de utilizar, o por periodos muy cortos, alguna forma de calefacción o de refrigeración. Sin embargo, además de estos climas “ideales” desde el punto de vista de confort térmico, existen climas duros o extremos, en donde se registra una gran variedad de las temperaturas durante el año, y a veces durante el día. Un ejemplo claro es el caso citado en la figura 1.1. Este ejemplo, corresponde a la ciudad de Temuco ubicada en la IX región. En la figura se grafican tres curvas, la línea roja (curva central) corresponde a la temperatura media de cada mes, la verde (curva superior) a su variación máxima, y la azul (curva inferior) a la mínima anual. Si establecemos como temperatura de confort (Victorero, 2008) un rango amplio entre 16°C y 26°C, área achurada de la figura 1.1, se puede observar que la curva de temperatura media se encuentra bajo este rango durante los meses de marzo a diciembre. Lo que nos indica que en Temuco es menester la calefacción durante la mayor parte del año.

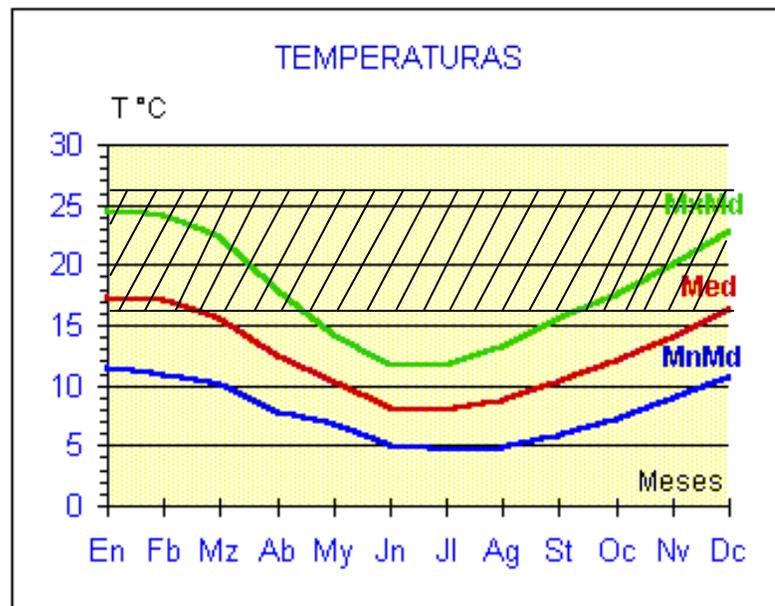


Figura 1.1 Registro de T° para la ciudad de Temuco (Ramírez E. 2010)

La tabla 1.1 entrega los valores de la temperatura media para la ciudad de Santiago, registrados en la estación de Quinta Normal y publicados en la NCh1079.Of.2008. En un círculo se destacan las temperaturas bajo el rango de confort establecido anteriormente. Se puede observar que entre los meses de abril y octubre, la necesidad de calefacción es prácticamente inevitable.

Tabla 1.1 Valores de temperatura media para Santiago - estación Quinta Normal (°C) (NCh 1079.Of.2008)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media Anual	Periodo
Quinta normal	20,9	19,9	17,6	14,2	11,1	8,5	8,1	9,5	11,5	14,5	17,3	19,9	14,4	1961 - 1990

La calefacción y refrigeración, quizás para la mayoría, es un problema que solucionamos sin preguntarnos mucho las posibles alternativas que en el mercado se manejan, y optamos por lo que creemos es más fácil, cercano o económico. Por lo general la solución no tiende a ser la más eficiente o amigable con el medio ambiente. Lamentablemente, como en muchas cosas, buscamos soluciones a los problema cuando estos se nos presentan, donde en realidad si nos damos cuenta y hacemos un pequeño análisis sabríamos que la solución más eficiente es evitar que los problemas se presenten. Entonces aparecen preguntas del tipo, ¿Cómo evitar los problemas de calefacción si los casos citados indican que es necesaria?, la respuesta a esta pregunta se podría dar con otra pregunta, ¿Por qué tener este tipo de problemas si pueden ser previstos? La etapa o periodo, donde estos problemas se pueden prever, corresponde a la etapa de ingeniería conceptual y de diseño, es aquí donde decidimos cómo será el comportamiento de nuestra construcción, ya sea en el ámbito de calefacción como en cualquier otro. Es decir, es aquí donde debemos realizar un diseño eficiente y acorde a las condiciones geográficas y climáticas locales en donde se va a diseñar y posteriormente construir.

Una forma de calefacción, utilizada especialmente en Europa, es el aprovechamiento geotérmico mediante sistemas de cañerías. Esta forma de calefacción tiene como concepto principal el de inercia térmica, que estudia la capacidad de un cuerpo de conservar el calor y la velocidad con que lo absorbe o lo entrega (Wikipedia, 2010). De esta forma, los sistemas geotérmicos buscan mover la masa de calor existente en el suelo a edificaciones, o mirado de

otra forma, busca mover la masa de calor de las edificaciones a las distintas capas de suelo (Katzenbach, 2008). De esta forma solo se mueve energía y no se genera.

Existen varios sistemas geotérmicos que se utilizan en muchos países del mundo (Sanner, 2001). Estos se dividen especialmente en abiertos y cerrados. Los circuitos abiertos utilizan agua subterránea para absorber o ceder calor de o hacia capas acuíferas del subsuelo y así realizar el intercambio de calor. Por otro lado los sistemas cerrados ubican los intercambiadores de calor en el subsuelo (ya sea en forma horizontal, vertical u oblicua), y un medio portador de calor, en muchos casos solo agua con anticongelante, circula dentro de los intercambiadores, transportando el calor de la tierra al inmueble y viceversa.

La energía geotérmica, si bien es una buena alternativa para disminuir el consumo de energía eléctrica destinada en calefacción, presenta una falencia. Su alto costo de implementación, y con mayor razón en un país como Chile donde su uso no es masivo y prácticamente los insumos a utilizar son todos importados, son factores, que hacen de esta alternativa una solución poco eficiente en costos de inversión. Dentro de los costos de implementación, se puede distinguir que existen costos principalmente asociados a materiales, mano de obra especializada y perforación, siendo este último, la variable más significativa (GEOMAD. 2011 y Girod Geotermia 2008) y relevante en lo que a costos de implementación se refiere, aproximadamente US\$300 por metro (Sharqawy, "et al", 2009). Entonces la inquietud que surge es; ¿existe alguna forma que nos permita aprovechar esta energía sin la necesidad de incurrir en grandes costos?

Es por este motivo y bajo esta inquietud que aparece la necesidad de buscar métodos o técnicas que disminuyan el costo y así hacer más competitiva esta forma de calefacción. Entonces aparece el concepto de "Energy Piles", que corresponde a un sistema cerrado de energía geotérmica, el que busca aprovechar la perforación ya hecha para la materialización de las pilas e instalar un circuito de cañerías acoplado a la armadura de la pila y embebido en el hormigón con el fin de obtener un equilibrio térmico con ella y así disminuir la variable costos de perforación en la que incurren los sistemas de aprovechamiento de energía geotérmica.

Como un estudio conjunto al proyecto Bicentenario Beauchef Poniente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, aprovechamos la oportunidad de realizar la investigación que tiene como principal objetivo estudiar la factibilidad constructiva de implementar un sistema geotérmico cerrado mediante un circuito de cañerías flexibles en 2 de las 111 pilas de entibación y sus respectivos anclajes (3 líneas de anclaje por

pila de aproximadamente 20 m cada una) y así tener a la pila como interfaz en el intercambio de calor con el suelo.

1.2 Detalles de una pila de entibación y sus anclajes

1.2.1 Descripción general

- Pila de entibación (PE):

Una pila de entibación corresponde a una columna de hormigón armado que tiene como finalidad u objetivo principal en una excavación el sostener el terreno y las construcciones adyacentes y así permitir la faena de excavación hasta el nivel de sello de fundación.

- Anclaje pos-tensado inyectado:

Los anclajes postensados inyectados son elementos capaces de transmitir una carga de tracción al terreno que se produce de la tensión del postensado en equilibrio con el empuje activo del volumen de suelo que soporta la pila de entibación según su área tributaria.

- Características anclajes

La PE consta de 3 niveles de anclaje (N.A.) N.A. 1= -5 m.

N.A. 2= -13 m.

N.A. 3= -21 m.

El largo total de cada anclaje está definido por Lo_i , con $i = 1, 2$ ó 3 según nivel de anclaje. Este largo total del anclaje está compuesto por un tramo libre y un tramo donde se desarrolla el bulbo del anclaje. A este último tramo se le conoce como longitud del bulbo y está identificado por Lv_i con $i = 1, 2$ ó 3 según nivel de anclaje. Los largos totales y del bulbo de los anclajes implementados y utilizados en esta investigación son los siguientes:

$Lo_1=19,6$ m. $Lv_1=3,5$ m.

$Lo_2=17,2$ m. $Lv_2=4,4$ m.

$Lo_3=12,5$ m. $Lv_3=4,6$ m.

Diámetro del anclaje: 9 cables $\Phi 0,6$ " c/u = 5 cm aprox.

Acero: ASTM A416

Denominación al tipo de anclajes según empresa a cargo de la ejecución de las pilas de entibación "PILOTES TERRATEST S.A.": TERR 6-9

La figura 1.3 muestra en elevación un corte longitudinal de una PE y sus respectivos anclajes, detallando los niveles en que se encuentra cada uno hasta el sello de fundación. Además se indican las nominaciones con las que se detalla cada anclaje, estas son:

$Lo = Lo_1, Lo_2$ ó Lo_3 : Largo total del anclaje.

$Lv = Lv_1, Lv_2$ ó Lv_3 : Largo del bulbo del anclaje.

$Lf = Lo_i - Lv_i$: Largo libre del anclaje. Con $i = 1, 2$ ó 3 .

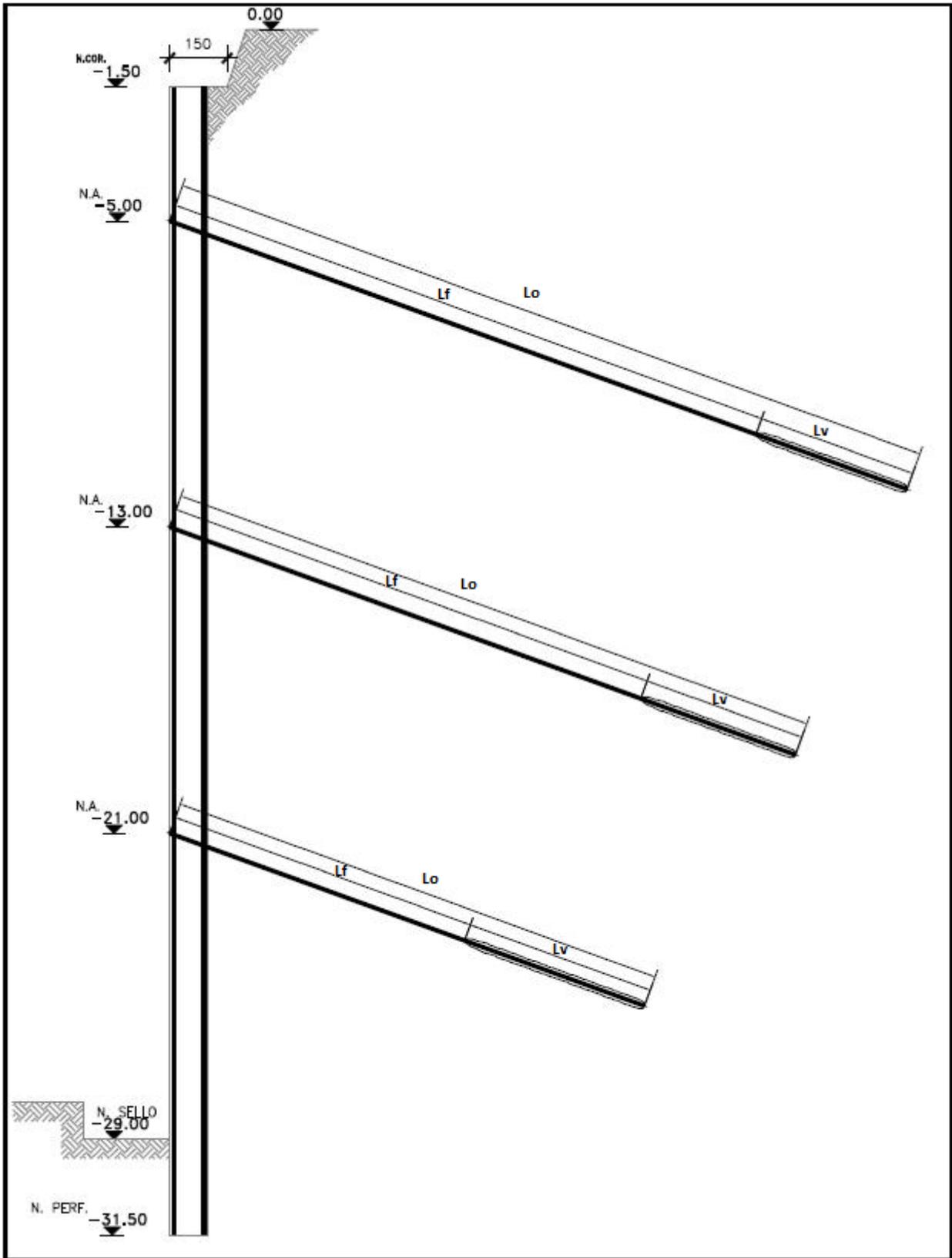


Figura 1.3 Modelo de una pila de entibación y sus anclajes (Pilotes Terratest S.A. 2009)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

- Estudiar la factibilidad constructiva de la implementación de pilas de entibación y sus respectivos anclajes mediante un circuito de cañerías flexibles para el aprovechamiento geotérmico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Implementación aplicada a 2 pilas de entibación y sus respectivos anclajes en el proyecto Bicentenario Beauchef Poniente.
- Obtención de una metodología constructiva eficiente de una pila y sus anclajes que permita la implementación del circuito de cañerías flexibles.
- Análisis del balance térmico obtenido en el circuito de cañerías flexibles instalado en las PE y sus respectivos anclajes.
- Análisis de los costos asociados a la implementación del circuito de cañerías en PE y sus respectivas líneas de anclajes.

1.4 Desarrollo del trabajo de título

El capítulo 1 corresponde a la introducción del trabajo de título. Tiene como objetivo principal ilustrar la inquietud que motivó la investigación. Además, entrega los objetivos que busca cumplir este trabajo de título. En el capítulo 2 se desarrolla el estudio de las metodologías constructivas que se identificaron a lo largo de la implementación y la o las metodologías constructivas que posteriormente se propusieron para una implementación de las PE y sus respectivos anclajes. El capítulo 3 corresponde al balance térmico. En este se desarrollan las actividades realizadas para la obtención de la temperatura del suelo y el aprovechamiento térmico del sistema de cañerías instalado en las PE y los anclajes. En el capítulo 4 se entrega el análisis de costos asociados a cada metodología constructiva identificada y propuesta con el fin de obtener una implementación geotérmica de las PE y sus anclajes que sea factible y al mismo tiempo eficiente en costos. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan los comentarios finales y conclusiones a los que lleva la investigación.

2. METODOLOGÍA CONSTRUCTIVA (MC)

La idea de identificar y realizar una metodología constructiva (MC) corresponde a indicar un camino, un paso a paso, o más bien una guía a la ejecución y forma de materializar un proyecto. Para este estudio, detallar una MC que abarque todos los pasos e identifique todos los percances, que de la ejecución puedan derivarse, es prácticamente imposible. Es por esto que resulta interesante y prácticamente necesario, el estudio de la MC más adecuada y eficiente que busque la factibilidad constructiva del aprovechamiento geotérmico de las PE y sus anclajes.

En este capítulo se desarrollan las MCs involucradas en el estudio, con el fin de lograr una implementación de las PE y los anclajes mediante el sistema geotérmico correspondiente al circuito de cañerías flexibles.

Las MCs identificadas en el estudio son las siguientes:

1. Metodología constructiva teórica (MCT): Corresponde a la primera MC identificada, bajo los supuestos teóricos con los que se contaban, es decir, la planificación de esta MC fue estructurada basándose en la forma en que el contratista de las PE y los anclajes habitualmente desarrollan este tipo de proyectos de entibación. Esta MC no contempla la implementación de las PE y sus anclajes, solo se identificó con el fin de tener una MC base para poder realizar el diseño de la implementación.
2. Metodología constructiva de diseño (MCD): En base a la MCT se diseñó la implementación de las PE y los anclajes. Esta implementación es detallada mediante la MCD.
3. Metodología constructiva aplicada (MCA): Siguiendo la MCD se logró la implementación tanto de las PE como de los anclajes, sin embargo, fue necesario realizar modificaciones a la MCD, debido a actividades que fueron necesarias realizar y que no eran posibles que fueran previstas en el diseño. La MC resultante de la implementación realizada, con los ajustes que fue necesario realizar, se identificó como MCA.

4. Metodología constructiva propuesta (MCP): Basándose en lo aprendido durante la implementación y tomando en cuenta todas las MCs anteriormente señaladas, se realizó una MC que hizo factible la implementación de las PE y los anclajes de una forma eficiente, en tiempo y en su forma de ejecución, tanto para la implementación como para la construcción de la PE y los anclajes. Esta MC corresponde a la MCP.

La figura 2.1 detalla el desarrollo de las metodologías constructivas identificadas y estudiadas en este capítulo tanto para las pilas de entibación como para los anclajes.

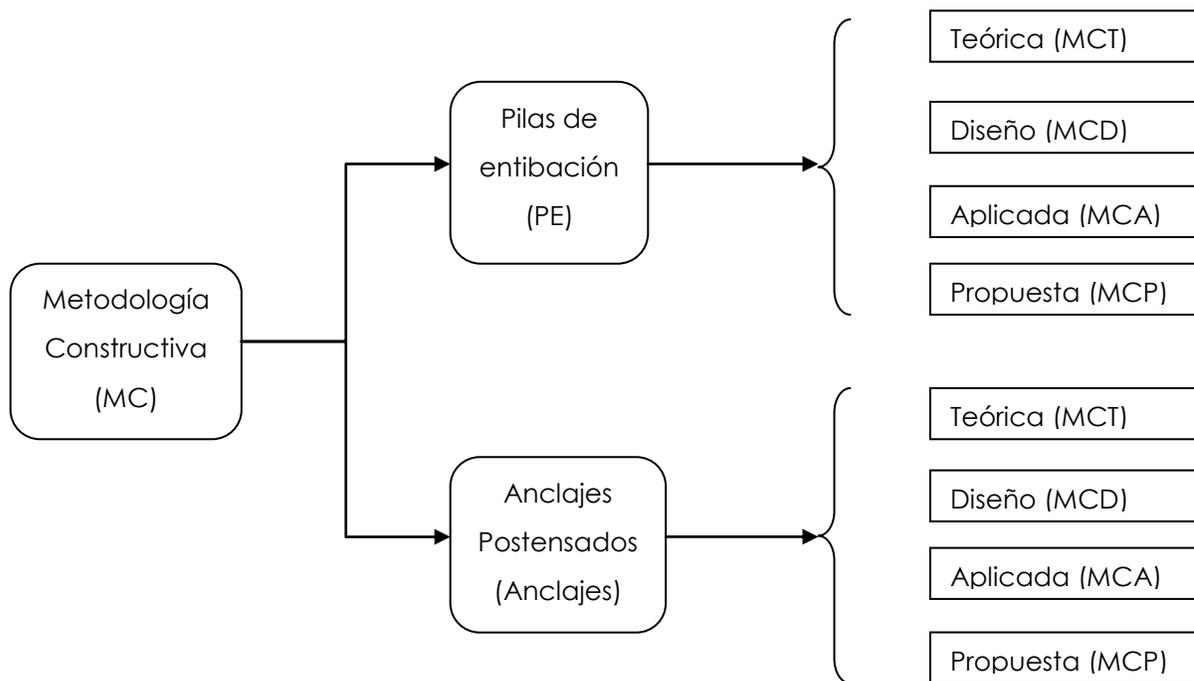


Figura 2.1 Desarrollo del capítulo de MC

- Diagrama de las Metodologías Constructivas estudiadas para la implementación de PE.

El esquema representado en la figura 2.2 ilustra las distintas etapas que componen cada MC identificada y estudiada en la implementación de las PE.

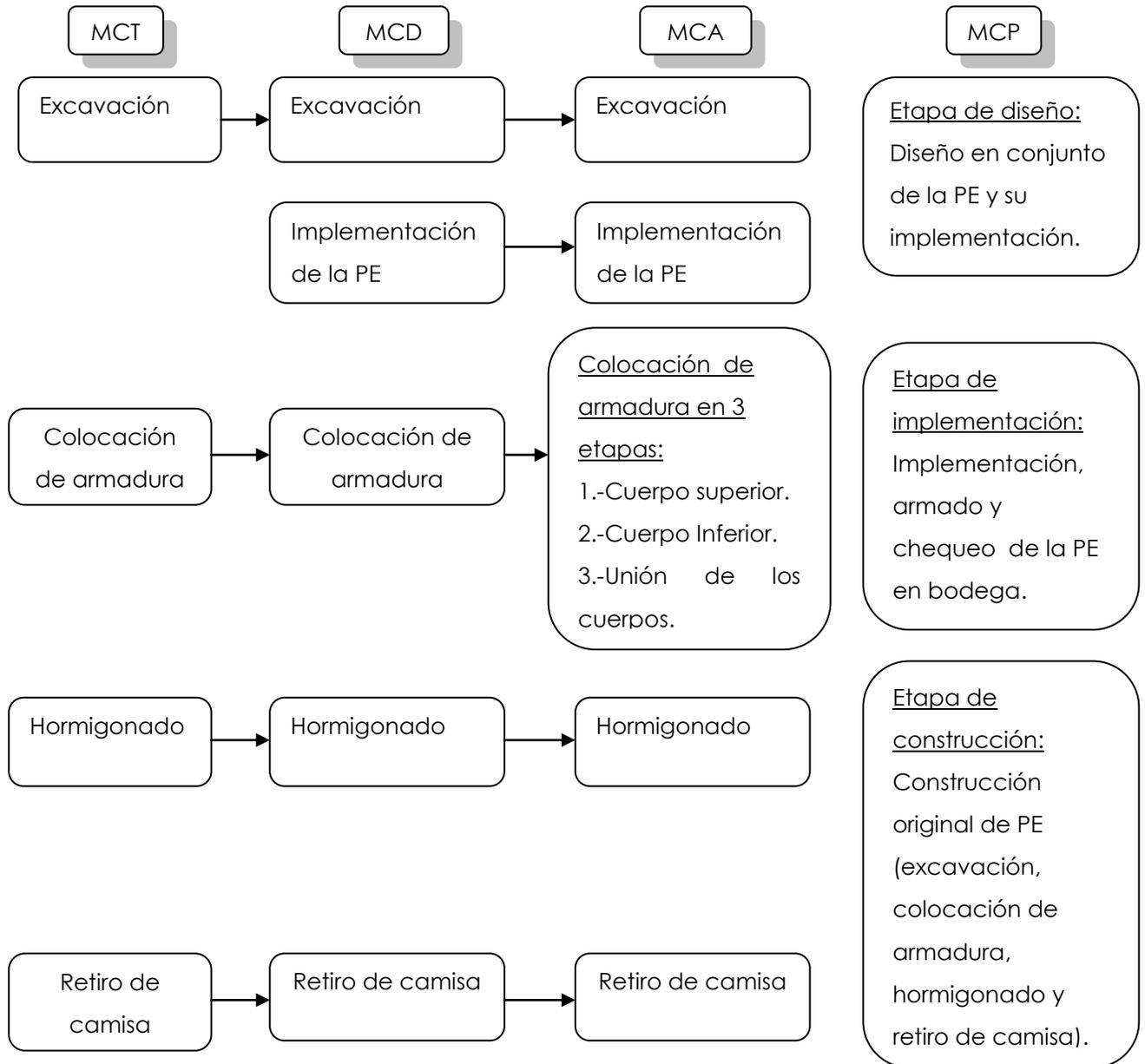


Figura 2.2 Etapas identificadas y desarrolladas para la implementación de las PE.

- Diagrama de las Metodologías Constructivas estudiadas para los anclajes.

El esquema representado en la figura 2.3 ilustra las distintas etapas que componen cada MC identificada y estudiada en la implementación de los anclajes.

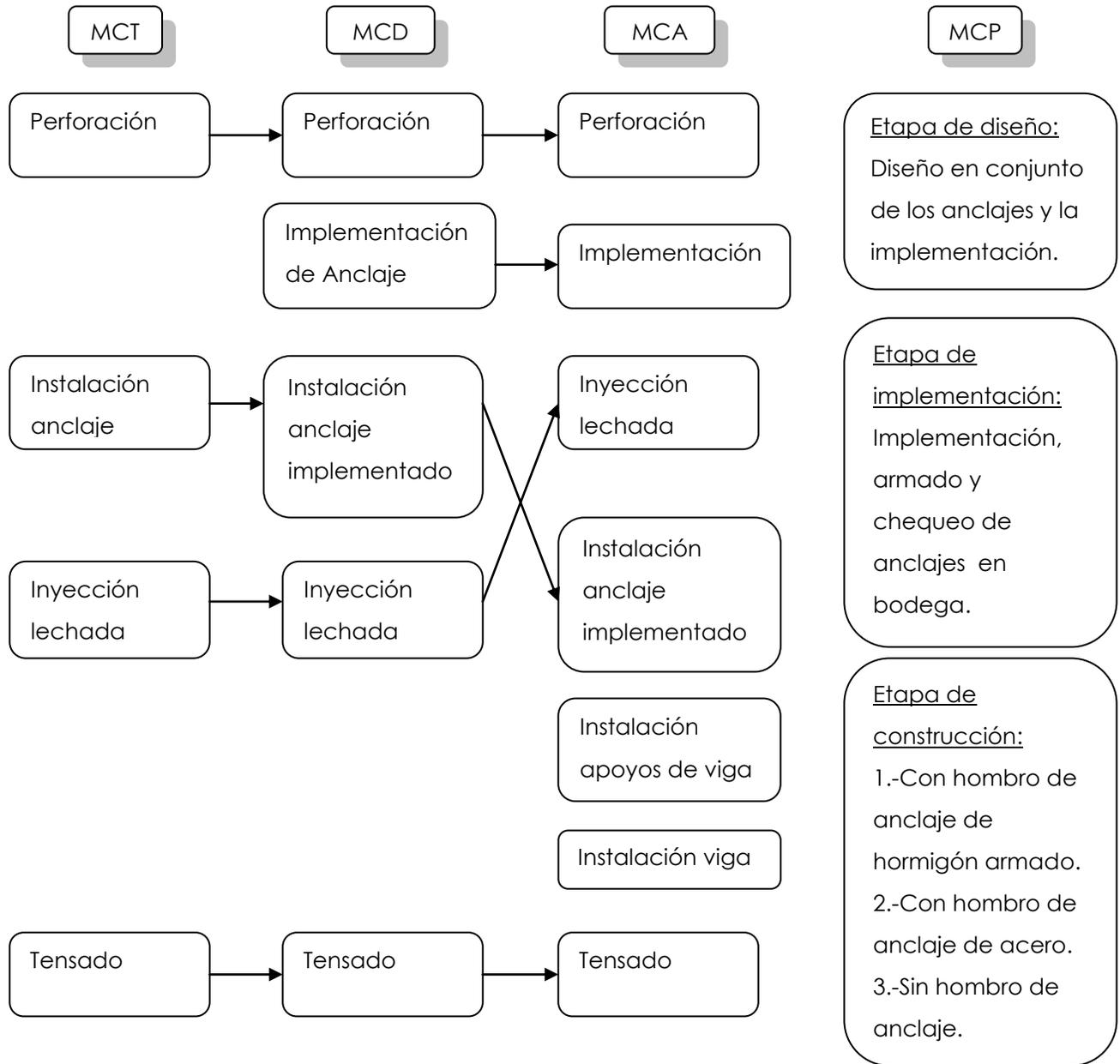


Figura 2.3 Etapas identificadas y desarrolladas para la implementación de los anclajes.

A continuación se describen y explican en detalle las MC mencionadas tanto para la implementación de las PE como para la de los anclajes:

2.1 Metodología constructiva teórica (MCT).

La investigación de una MC propia de las PE y los anclajes, que otorgue información sobre la forma de construcción, es el punto de partida para poder realizar un diseño de la implementación del sistema geotérmico lo más cercano a la realidad posible.

La información investigada y prácticamente recolectada tanto para las PE como para los anclajes, se detalla a continuación.

2.1.1 MCT para una PE.

Mediante una recolección de información en reuniones con los contratistas a cargo de la entibación del proyecto Beauchef Poniente, sobre las metodologías habituales aplicadas por ellos a este tipo de proyectos, se obtuvo la metodología constructiva teórica empleada en la construcción de una pila de entibación. Esta corresponde al método llamado "Rotación con entubación recuperable" y se describe en la figura 2.4.

1. Excavación con hélice o balde conteniendo las paredes de la perforación mediante tubería metálica (camisa).
2. Colocación de la armadura.
3. Hormigonado con tubo tremie.
4. Extracción simultánea de la tubería de revestimiento.
5. Pilote terminado.

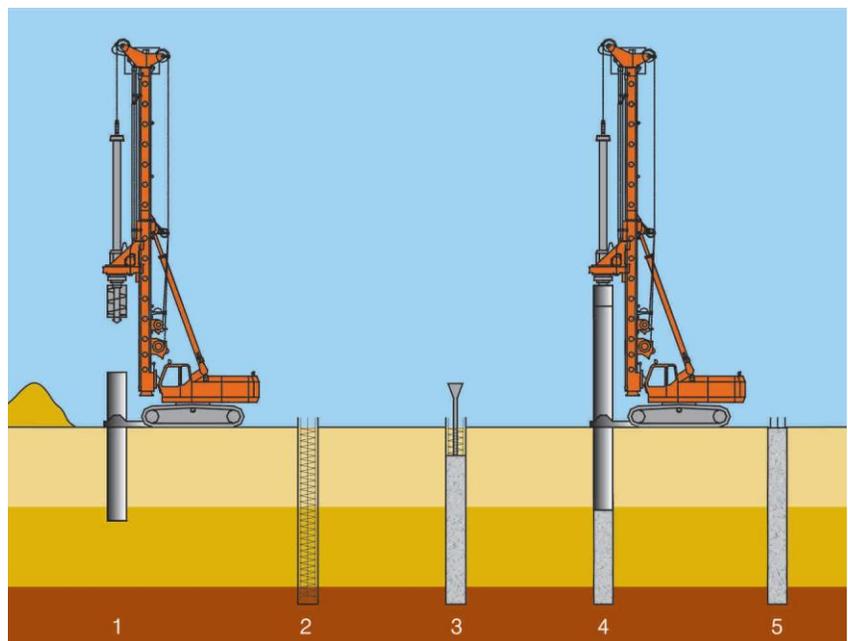


Figura 2.4 Esquema MC para PE. (Pilotes Terratest S.A. 2010),

2.1.2 MCT para los anclajes.

En las figura 2.5.a, 2.5.b, 2.5.c y 2.5.e se ilustra la metodología constructiva teórica para los anclajes (Pilotest Terratest S.A. 2009).

1. Perforación en el terreno mediante rotación.

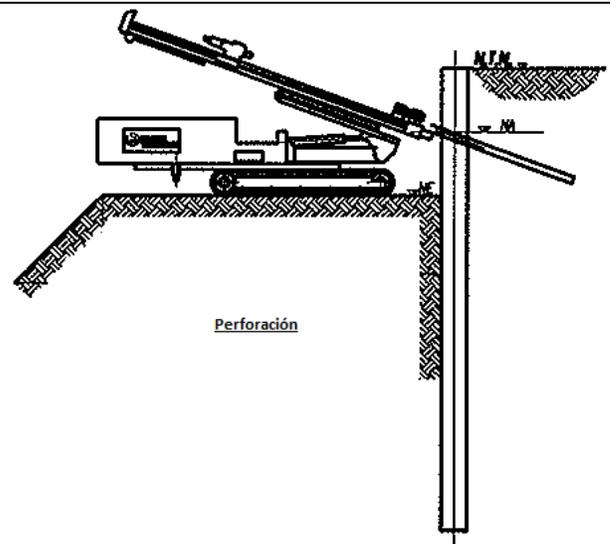


Figura 2.5.a Perforación (1)

2. Instalación del anclaje de cables dentro de la perforación.

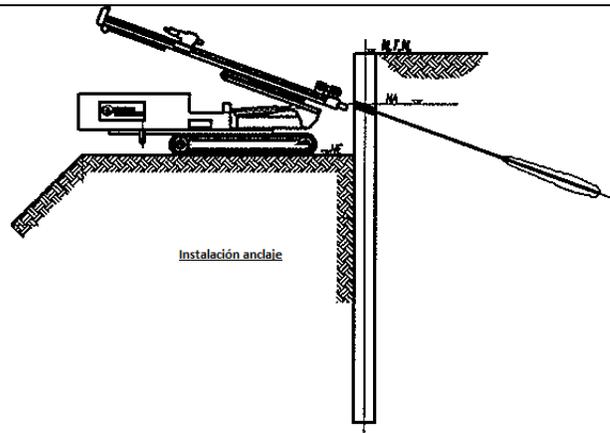


Figura 2.5.b Instalación anclaje (2)

3. Inyección de la lechada de cemento para lograr el bulbo del anclaje que proporcionará el anclaje efectivo al suelo. Simultáneamente se comienza la extracción de la tubería metálica de revestimiento.

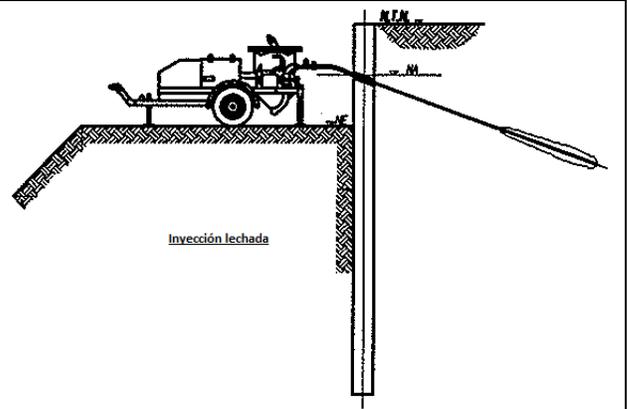


Figura 2.5.c Inyección lechada (3)

4. Luego que la lechada de cemento alcanza la resistencia adecuada se prueba y se tensa el anclaje mediante un sistema hidráulico para dejarlo en la carga de servicio.

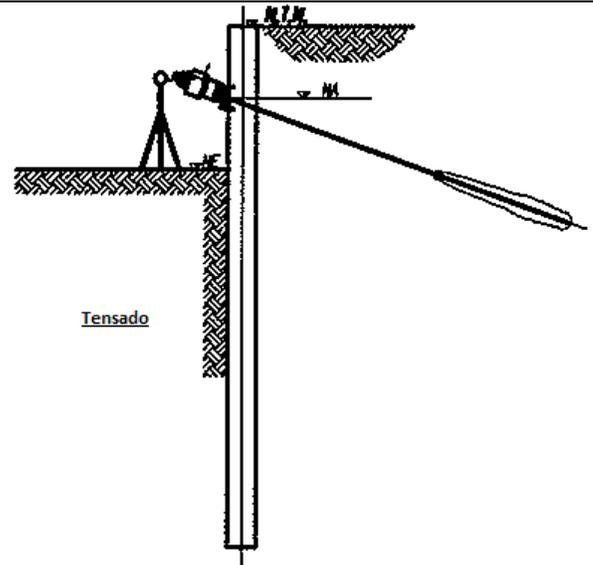


Figura 2.5.e Tensado (4)

Bajo estas metodologías de ejecución, tanto para las PE como para los anclajes, se diseñó un procedimiento de implementación en terreno que ocasionara la menor alteración en la rutina de construcción ya programada por la empresa a cargo de la obra. Esta nueva metodología consiste en agregar pasos adicionales entre las etapas especificadas anteriormente, con el fin que sea una incorporación de nuevas tareas y no una modificación de las tareas existentes.

Estas nuevas metodologías, tanto para la PE como para los anclajes, se especifican en el punto 2.2.

2.2 Metodología constructiva de diseño (MCD).

Basados en la información investigada sobre la ejecución de la construcción de las PE y los anclajes, se realizó el diseño de la implementación del sistema geotérmico a realizar en las PE y los anclajes. A continuación, en los puntos 2.2.1 y 2.2.2, se describen las MCD tanto para una PE como para los anclajes, en donde se destaca con letra negrita, las actividades extras que fueron necesarias integrar para lograr la implementación.

Cabe destacar que "implementación" corresponde a integrar de manera solidaria a la armadura para el caso de las PE y a los cables para el caso de los anclajes, el circuito de cañerías flexibles. Este circuito consta de dos extremos (una entrada y una salida) y su longitud de recorrido a lo largo de la PE o del anclaje según corresponda.

2.2.1 Metodología constructiva de diseño (MCD) para la implementación de PE

1. Excavación con hélice o balde conteniendo las paredes de la perforación mediante tubería metálica (camisa).
2. **Implementación de la PE. Colocando el circuito de cañerías flexibles de manera solidaria a la armadura de la PE.**
3. Introducción de la PE **implementada con el circuito de cañerías flexibles en la excavación.**
4. Hormigonado con tubo tremie **cuidando que tubos de entrada y salida del circuito de cañerías flexible quede fuera de la PE.**
5. Extracción simultánea de la tubería de revestimiento (camisas).
6. **Pilote implementado** terminado.

2.2.2 MCD para la implementación de anclajes.

1. Perforación en el terreno mediante rotación.
2. **Implementación del anclaje de cables mediante un circuito de cañerías flexibles.**
3. Instalación del **anclaje de cables implementado** dentro de la perforación.
4. Inyección de la lechada de cemento para lograr el bulbo del anclaje que proporcionará el anclaje efectivo al suelo. Simultáneamente se comienza la extracción de la tubería metálica de revestimiento. **Ambos procesos se realizarán cuidando que la**

entrada y salida del circuito de cañerías flexibles no sufra daños que comprometan su funcionamiento.

5. Luego que la lechada de cemento alcanza la resistencia adecuada se prueba y se tensa el anclaje mediante un sistema hidráulico para dejarlo en la carga de servicio.

2.3 Metodología constructiva Aplicada (MCA) en la implementación de PE y Anclajes.

Basados en la metodología constructiva teórica (MCT) y la de diseño (MCD), se procedió a la implementación de las PE y sus respectivas líneas de anclajes. El procedimiento encontrado en terreno, si bien no dista mucho del estudiado en el diseño, sacó a flote una serie de pasos y contratiempos que deben ser considerados en el diseño previo.

Se detallarán las mismas actividades mostradas en la metodología constructiva de diseño, agregando las actividades o nuevos pasos que presentó la implementación en terreno, dando origen a la metodología constructiva aplicada MCA.

2.3.1 MCA para la implementación de las PE.

1. Excavación: La excavación se realizó con hélice o balde conteniendo las paredes de la perforación mediante tubería metálica (camisa). La figura 2.6 corresponde a una fotografía de la excavación de una PE.

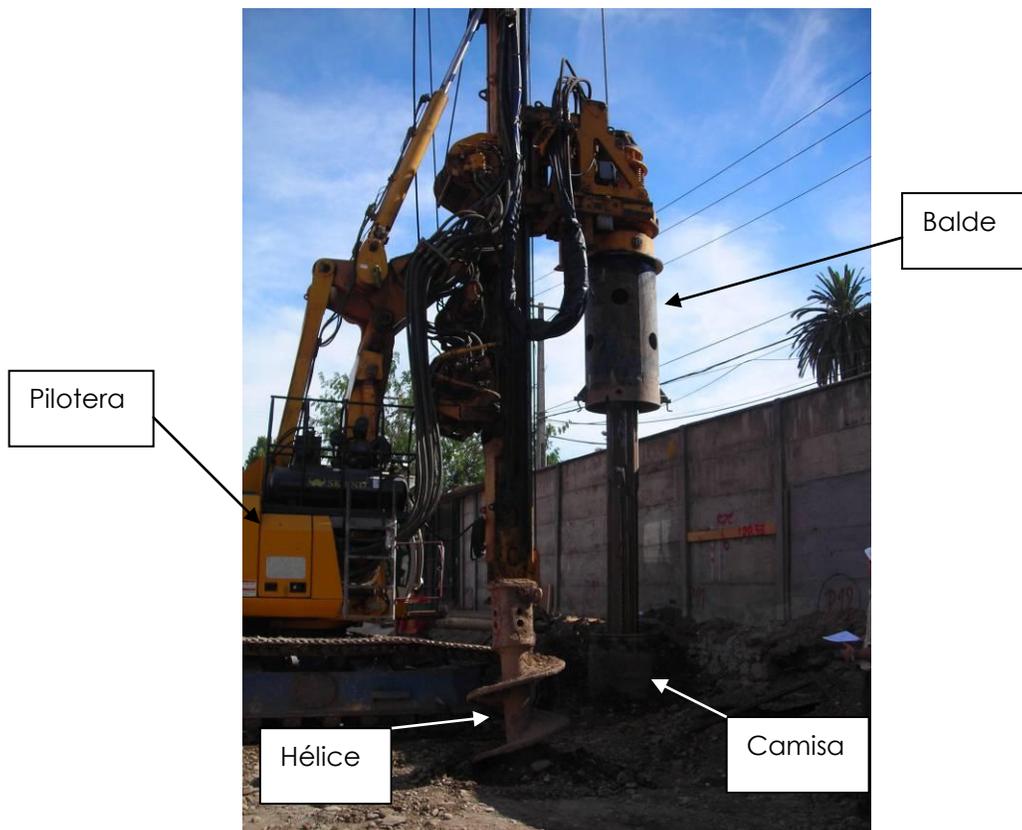


Figura 2.6 Excavación con pilotera.

2. Implementación de la armadura con el circuito de cañerías flexibles:

- La armadura real de la pila de entibación está compuesta por dos cuerpos, uno superior de 16,5 m de longitud y otro inferior de 12,0 m de longitud. Esto provocó que el circuito de cañerías flexibles debió ser dividido, al igual que el cuerpo de la armadura, en dos partes. Por ende, se agregó una actividad con respecto al diseño teórico que corresponde a medir, cortar y colocar fittings de uniones en los extremos que más adelante se unirán. Por otro lado se debió identificar mediante numeración cada tubería con su par en el otro cuerpo, como se muestra en las figuras 2.7 y 2.8, con el fin de realizar correctamente la conexión y obtener un circuito de cañerías flexibles cerrado con solo una entrada y una salida en su parte superior.

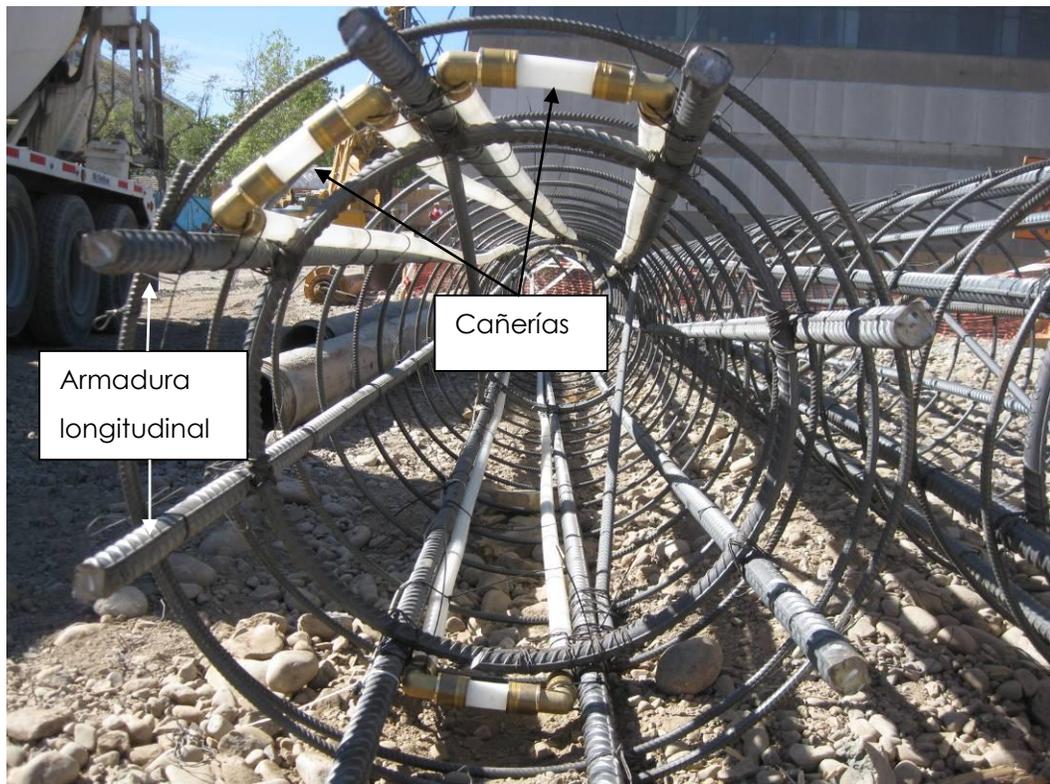


Figura 2.7 Circuito de cañerías flexibles colocado en la armadura de la PE101.

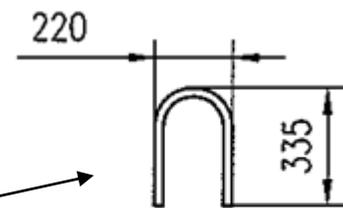


Figura 2.8 Numeración de las cañerías para la correcta conexión entre los cuerpos.

- Para colocar los cuerpos de armadura en la perforación, actividad que viene a continuación, se deben soldar a la armadura en su parte superior, y en caras opuestas, dos asas (figuras 2.9 y 2.10), las que corresponden a fierros $\phi 32$ y que cumplen la función de brindarle a la grúa, que elevará la armadura para colocarla en la perforación, un elemento resistente y seguro de agarre. El problema que se presentó en esta etapa se debe a que al soldar las asas a la armadura longitudinal de la pila de entibación, los fierros alcanzan una gran temperatura, por ende las cañerías no deben quedar en contacto con los fierros que van a ser ocupado para soldar las asas, y como son dos asas por cuerpo esto corresponde a 4 fierros longitudinales, de un total de 8, que no pueden ser ocupados para fijar las tuberías flexibles.



Figura 2.9 Asa soldada en cuerpo inferior de armadura.



**4 Asas de izaje $\phi 25$
Acero dulce doblado en caliente
L = 750 mm**

**Figura 2.10 Detalle de las asas utilizadas
(Terratest, 2009)**

3. Colocación de la armadura implementada (por cuerpo):

- Primero se procede a colocar el cuerpo inferior. Este cuerpo, al igual que el superior, se coloca en la perforación mediante el uso de una grúa, la que eleva el cuerpo en forma vertical mediante dos cadenas conectadas a las asas de agarre. Una vez puesto el cuerpo inferior, se procede a fijarlo mediante un fierro de tope que cruza perpendicularmente la armadura a través de las dos asas opuestas apoyándose en el borde de la camisa de la perforación, permitiendo la desconexión de la grúa del cuerpo inferior.

- Con el cuerpo inferior suspendido la grúa toma, mediante el mismo procedimiento, el cuerpo superior de la armadura y lo alinea con el cuerpo inferior.
- Con los dos cuerpos alineados se procede a soldar los 4 pares de fierros longitudinales entre el cuerpo superior e inferior, otorgándole el agarre necesario a la armadura para completar el izaje y depositar la armadura al interior de la excavación de la PE en preparación del hormigonado. En esta etapa los fierros longitudinales alcanzan gran temperatura, por ende no debían ser ocupados con cañerías en la implementación, o en consecuencia, e debe esperar un periodo de tiempo que los fierros bajen su temperatura, para luego fijar las cañerías a estos. Proceso que provocaría un retraso.
- Una vez terminado el proceso de soldar los 4 fierros del cuerpo inferior con los 4 fierros del cuerpo superior, se procedió a unir las parejas de cañerías, es decir, unir las cañerías de la implementación del cuerpo inferior con las cañerías de la implementación del cuerpo superior. Este proceso corresponde a unir mediante fittings, llamados coplas de unión, las parejas de cañerías correspondientes según la identificación antes realizada.

La figura 2.11 muestra el instante en donde se introduce el cuerpo superior de la armadura ya implementada, sobre el cuerpo inferior. En la figura se puede observar los extremos de cañerías que deben ser conectados una vez termine el proceso de soldadura entre los cuerpos.



Figura 2.11 Maquina pilotera colocando cuerpo superior de la armadura de la PE101.

4. Hormigonado: El hormigonado se realiza con tubo tremie cuidando que tubos de entrada y salida del circuito de cañerías flexible queden fuera de la pila.
 - Antes de empezar con el hormigonado, el circuito de cañerías flexibles es llenado con agua y sellado en sus dos extremos, con el fin de contrarrestar la presión que provoca el hormigón sobre estas.
 - El tubo tremie corresponde a un tubo de acero de aproximadamente 25 cm de diámetro y que en su parte superior va conectado a un embudo que desde la conexión con el tubo tremie varía su diámetro hasta llegar en su parte superior a un diámetro máximo de aproximadamente 120 cm, que es donde el camión mezclador vierte el hormigón. En este proceso se debe cuidar que las cañerías no sean dañadas cuando el embudo se apoya en la camisa metálica.

La figura 2.12 ilustra el momento del hormigonado de la PE101 ya implementada.



Figura 2.12 Hormigonado de la PE.

5. Extracción simultánea de la tubería de revestimiento (camisa):

- Este proceso consiste en retirar los cuerpos de tubería de revestimiento colocados en la etapa de excavación para sostener el suelo. Estos cuerpos reciben el nombre de camisas, y tienen una longitud de aproximadamente 6 metros cada uno. El proceso de extracción de las camisas es de gran riesgo para el circuito de cañerías instalado. En primer lugar, como este proceso es realizado mediante torques o giros intermitentes inducidos a la camisa, a medida que se extraen, se produce un giro desconocido en la armadura, y por ende de las tuberías. Lo que inducirá a una ubicación final de gran incertidumbre de las cañerías dentro de la perforación. En segundo lugar, a medida que las camisas se van retirando, el nivel de hormigón, aun fresco dentro de la perforación, baja, ya que ocupa el espacio que las camisas dejan. Por ende, se produce una succión de las tuberías. Es por este motivo que deben estar seguras en sus amarres a la armadura, tanto en su extremo superior como a lo largo de su recorrido dentro de la PE.

6. PE implementado.

La figura 2.13 ilustra la PE ya terminada. En la figura es posible observar el par de cañerías (entrada y salida) del circuito instalado.



Figura 2.13 Pila de entibación implementada.

La implementación se realizó en dos PE (PE101 y PE100), la diferencia entre una y otra corresponde a la distribución del circuito de cañerías flexibles que se colocó de forma solidaria a la armadura. En la PE número 101 (PE101) se implementó un circuito vertical, por otro lado, en la PE número 100 (PE100) se implementó un circuito helicoidal.

Las figuras 2.14 y 2.15 ilustran la distribución vertical del circuito de cañerías implementado en la PE101 con una longitud total de 170 m. Para ejemplificar la ilustración se esquematiza la superficie de la pila desarrollada en un solo plano. La separación "S" entre las cañerías es variable debido a las restricciones de soldadura, asas y perforación de las PE para el paso de los anclajes.

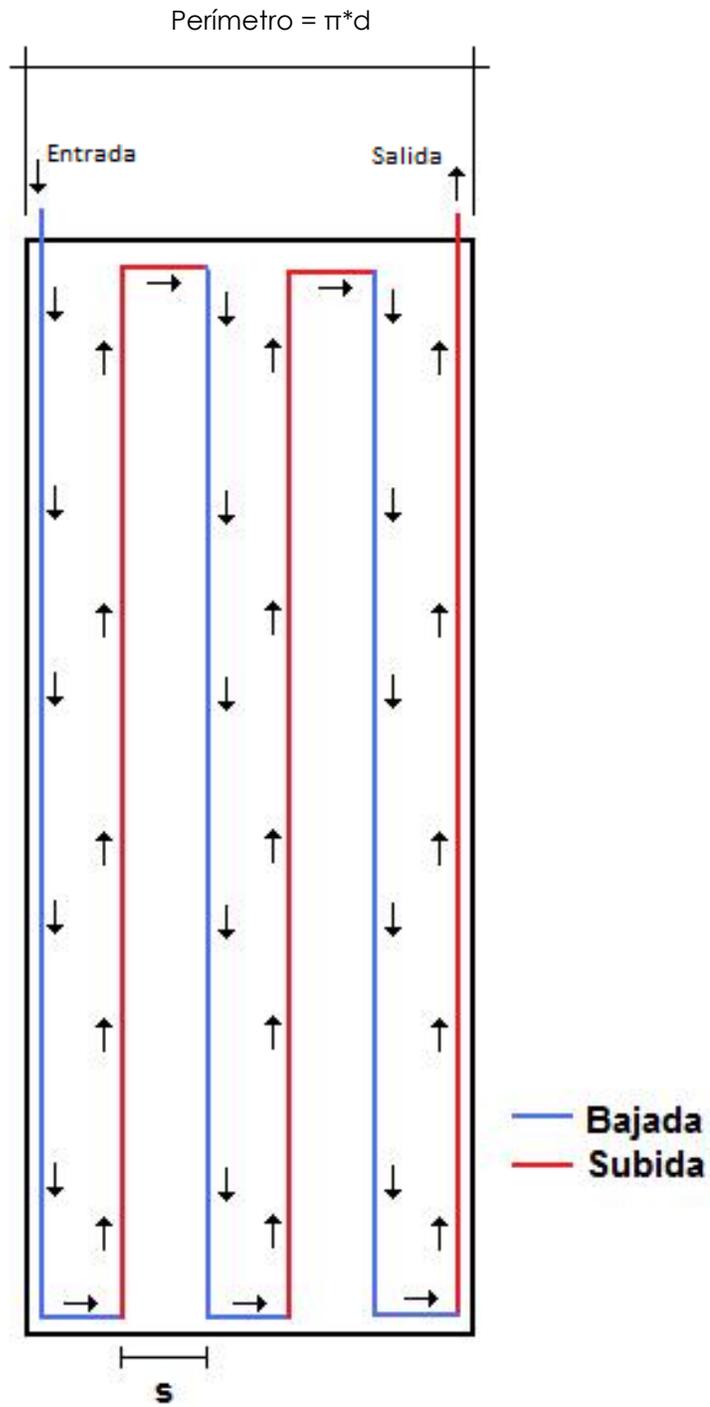


Figura 2.14 PE implementada con circuito vertical (PE101).



Figura 2.15 Fotografía de PE101 implementada con circuito vertical.

Las figuras 2.16 y 2.17 ilustran la distribución helicoidal del circuito de cañerías implementado en la PE100 con una longitud total de 170 m. La separación "S" entre cañerías es uniforme y de aproximadamente 30 cm.

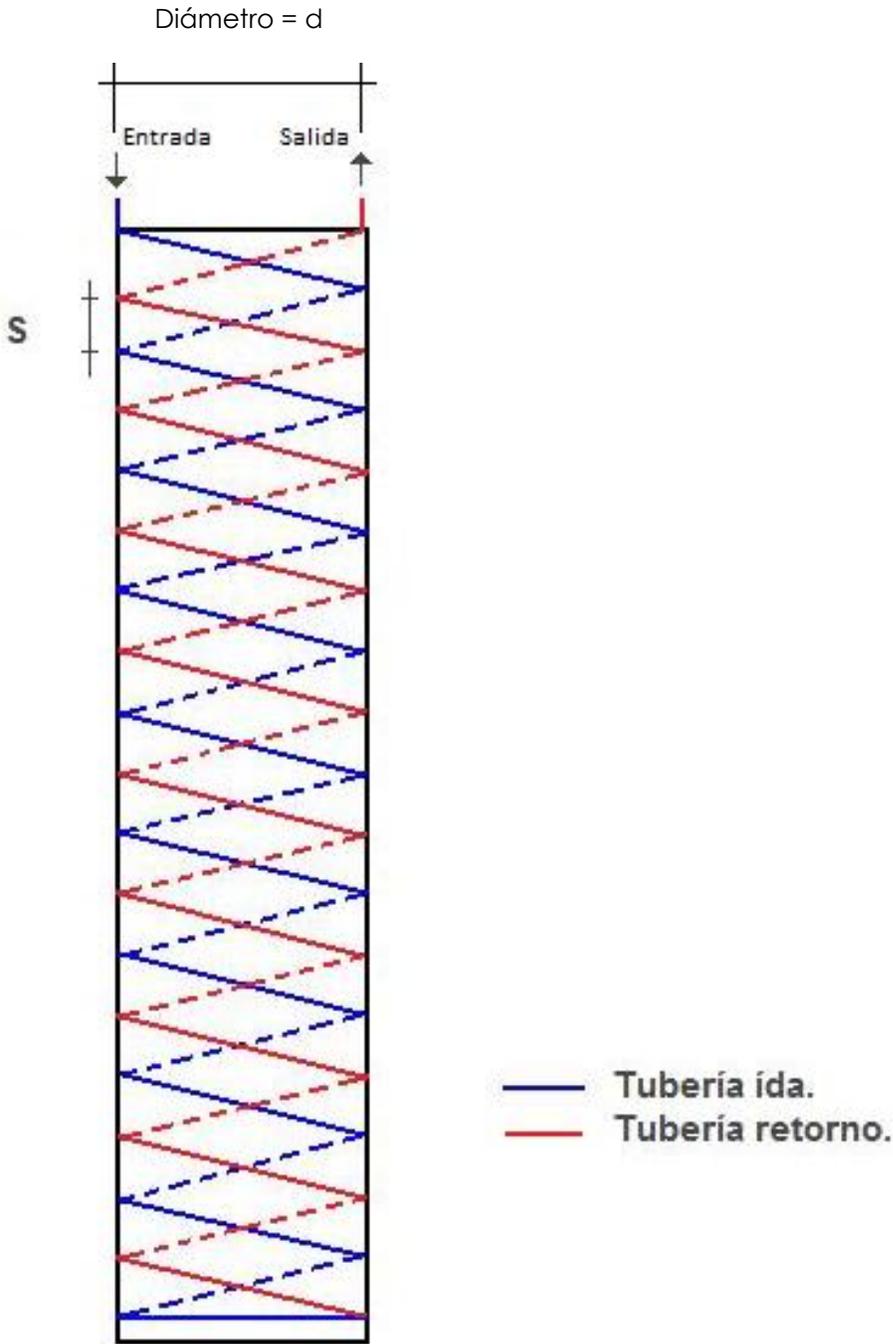


Figura 2.16 PE implementada con circuito helicoidal (P100).



Figura 2.17 Fotografía de PE100 implementada con circuito helicoidal.

2.3.2 MCA para la implementación de los anclajes.

La metodología constructiva aplicada para la implementación de los anclajes, consideró las siguientes actividades:

1. Perforación: Se realizó la perforación en el terreno mediante rotación. La figura 2.18 muestra el momento en que la máquina de sondaje realiza la perforación del anclaje.



Figura 2.18 Perforación para anclaje

2. Implementación del anclaje de cables con el circuito de cañerías flexibles:
 - La perforación realizada tiene como diámetro máximo 11.5 cm, lo que limitó la conexión en forma de "U" que debe tener el circuito de cañerías en el extremo inferior para generar el retorno del circuito. Debido a lo limitado del espacio, no se puede materializar esta conexión en "U" mediante un fitting de tamaño comercial, entonces se realizó una conexión mediante un fitting llamado "codo ángulo 90°" como se muestra la figura 2.19.



Figura 2.19 Retorno en forma de "U" utilizado en el circuito de cañerías flexible de los anclajes.

- Luego de realizada la conexión en "U", se procedió a fijar el circuito de cañerías al anclaje mediante la utilización de huincha adhesiva (Duct Tape), dejando aproximadamente los dos metros finales del anclaje sin cañería. Esto tiene como finalidad el evitar un daño en el retorno del circuito de cañerías en el momento de introducción del anclaje implementado en la perforación.

3. Inyección de lechada: Se procede a la inyección de lechada en la perforación. Este proceso se realiza antes de colocar el anclaje de cables implementado. La figura 2.20 muestra en un círculo la actividad de inyección de lechada en la perforación.

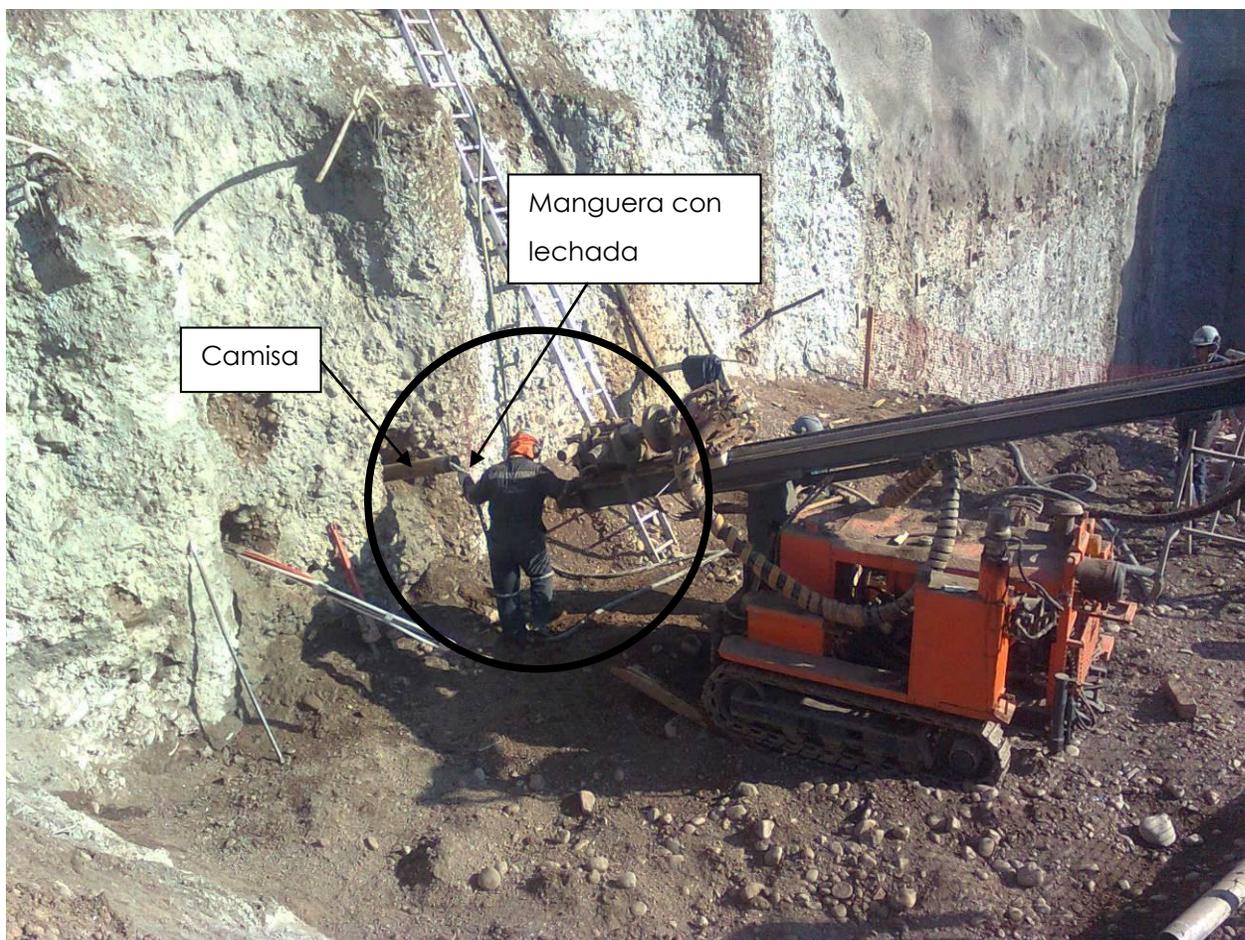


Figura 2.20 Inyección de lechada en la perforación del anclaje.

4. Introducción del anclaje implementado: Se introduce el anclaje implementado dentro de la camisa que contiene las paredes de la perforación llena con lechada de hormigón.

La figura 2.21 ilustra la instalación de la primera línea de anclaje por la camisa.

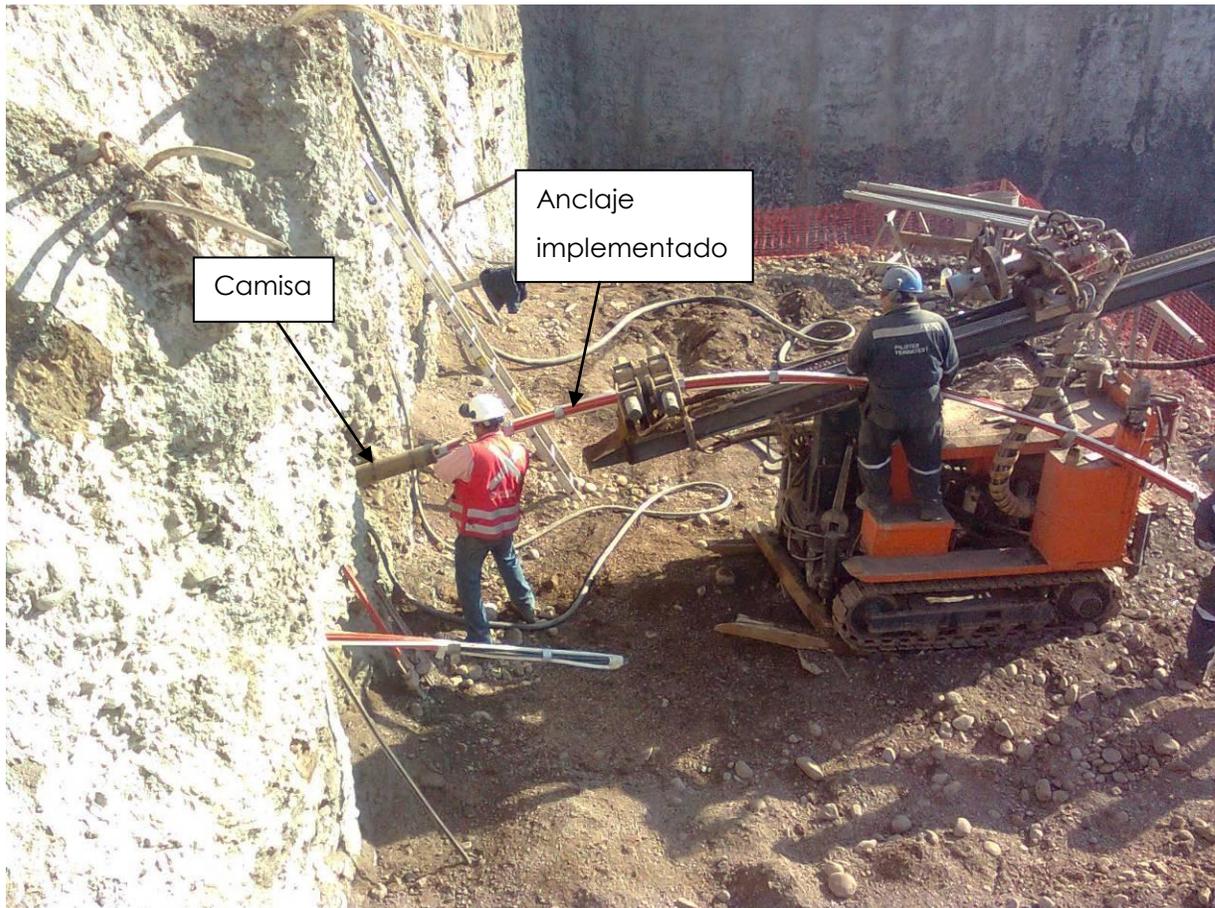


Figura 2.21 Introducción del anclaje implementado.

5. Luego que la lechada de cemento alcanza la resistencia adecuada (5 días, dato entregado y medido en terreno) se prueba y se tensa el anclaje mediante un sistema hidráulico hasta la carga de servicio.

La figura 2.22 muestra la primera línea de anclajes de la PE100 y PE101 ya implementada.

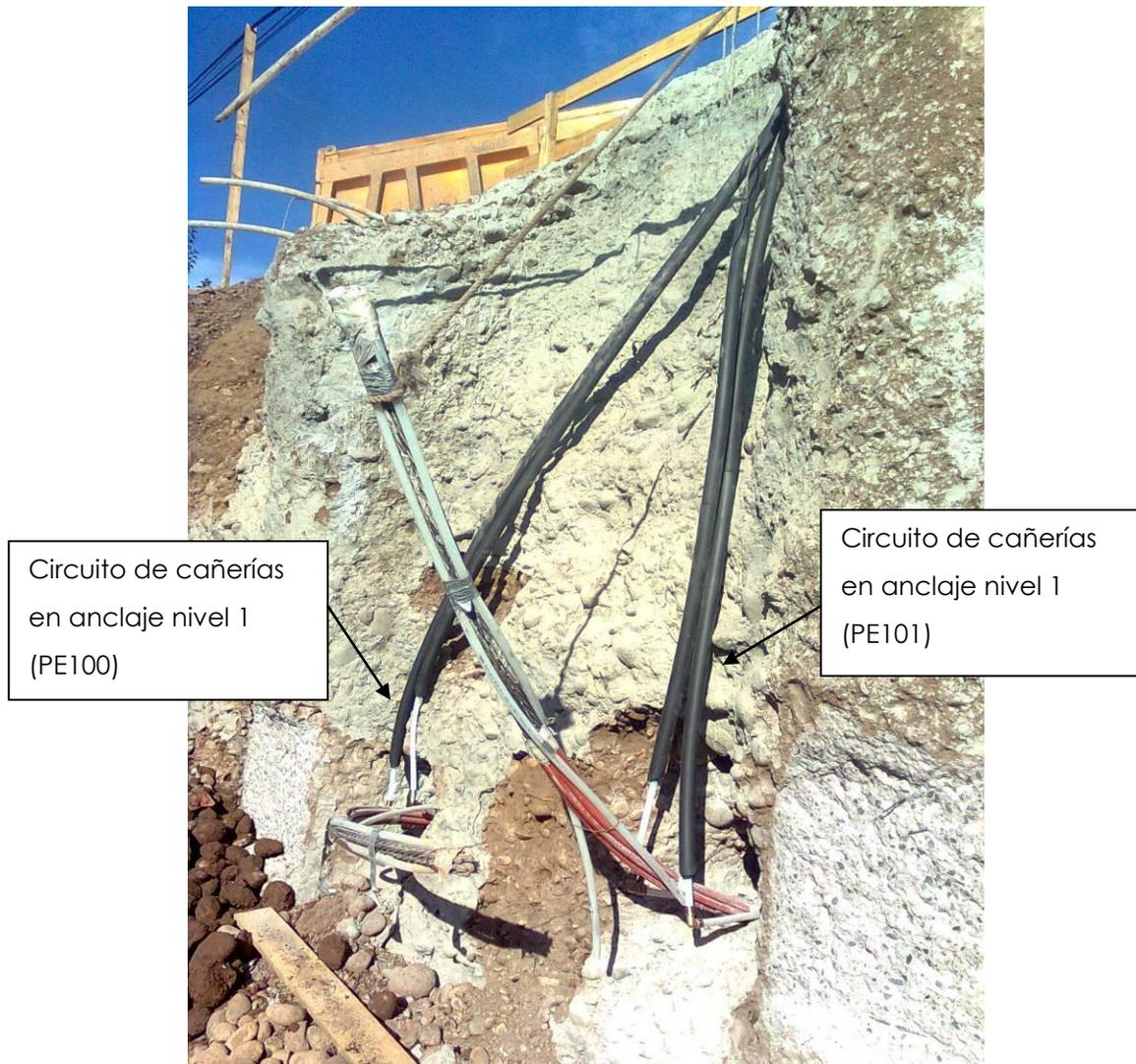


Figura 2.22 Circuito de cañerías implementado en el anclaje.

2.4 Metodología constructiva propuesta (MCP) para la implementación de las PE y los Anclajes.

Las MCD, tanto para las PE como para los anclajes, se basaron principalmente en dos estudios. El primero corresponde a la investigación previa de una metodología constructiva común para PE y anclajes, es decir, una forma de operación que se maneja en la teoría. En segundo lugar, se estudió la forma de implementación más factible, que indujera a la menor cantidad de percances en la intervención y al menor retraso o demora en los tiempos de operación. Entonces, bajo estas premisas se desarrolló la metodología constructiva de diseño (MCD) tanto para las PE como para los anclajes. Esta metodología se comparó con la metodología constructiva real aplicada en terreno (MCA). Y en base a esta comparación, se analizaron las nuevas etapas o actividades que fueron necesarias agregar debido a los percances y lecciones aprendidas que nacieron de la implementación realizada. A esta nueva metodología de implementación basada en lo realizado en las MCD y MCA, se le llamó metodología constructiva propuesta "MCP", la cual detalla, tanto para las PE como para los anclajes, la forma en que deben ser implementados con el objetivo de evitar los percances ya experimentados y obtener una implementación con un mayor grado de eficiencia en tiempos de operación y en instalación del sistema de aprovechamiento geotérmico. Antes de detallar las metodologías constructivas que se proponen, tanto para la implementación de las PE como para la implementación de los anclajes, se detallarán las tareas que fueron necesarias agregar y los inconvenientes que se debieron resolver en el transcurso de la implementación.

2.4.1 Descripción de las nuevas tareas que fueron necesarias integrar e inconvenientes que se presentaron

- Implementación de las Pilas de entibación.

1. El primer problema que se presentó en la implementación de las PE corresponde a que el cuerpo de armadura estaba compuesta por dos partes, una superior y otra inferior. Esto generó, que al igual que la armadura, el circuito tanto de la PE101 como de la PE100, debió ser separados en dos cuerpos. Agregando la actividad de unión del circuito de cañerías instalado en el cuerpo inferior de la armadura con el circuito de cañerías instalado en el cuerpo superior de armadura. Esta actividad tomo lugar entre las etapas de soldadura de los cuerpos de armadura y la de traslapo. La etapa de soldadura es un proceso exotérmico, por ende, se debe tener cuidado en fijar las cañerías a fierros longitudinales que no estén involucrados en este proceso, o por el contrario, se deben mantener alejadas las cañerías

hasta que los fierros longitudinales liberen el exceso de calor para luego poder fijar las cañerías a estos. Esto claramente provoca un retraso en la ejecución de las PE.

2. El cuerpo superior de la armadura de las pilas de entibación es armado por la empresa a cargo de la construcción de los pilotes de entibación, en este caso Pilotes Terratestt S.A., y luego es llevado a obra mediante el uso de camiones. Por el contrario, el cuerpo inferior es armado en terreno. Aquí se generan dos problemas, en primer lugar, como parte de la armadura es armada en terreno, y los espacios en obras son por lo general pequeños, el número de cuerpos de armadura disponibles para trabajar es pequeño, y estos cuerpos de armadura llegan prácticamente el mismo día, entonces no se dispone del cuerpo de armadura con tanta anterioridad para poder realizar la implementación y en caso de presentarse un percance tener el tiempo suficiente para actuar de la mejor forma. En segundo lugar, al fabricarse el cuerpo inferior en obra, los fierros longitudinales que forman la armadura, por lo general no quedan alineados en una vertical, sino más bien forman una helicoidal que empieza a rodear la armadura. El problema que se genera debido a esta mala materialización de la armadura, es que la pila como es de entibación, debe ser perforada y atravesada por el anclaje, entonces si la armadura no sigue una distribución de sus fierros longitudinales de forma vertical, las tuberías que son solidarias a ellos tampoco lo seguirán, por ende la PE no podría ser perforada para colocar los anclajes, ya que, con seguridad que en la etapa de perforación además de atravesar el hormigón y los fierros, se atravesarían las tuberías. Este problema se solucionó colocando una viga de amarre sobre la pila en donde el anclaje actúa sobre esta viga y así se transmite la tensión del anclaje a la pila, evitando perforar la PE.
3. Un tercer problema corresponde a la utilización de asas soldadas a los extremos de cada cuerpo de la armadura con el fin de otorgar a la grúa un agarre firme para levantar los cuerpos de armadura. Las asas corresponden a unos ganchos de acero que van soldados a la armadura longitudinal. El proceso de soldar, como ya se mencionó, es un proceso exotérmico, por ende los fierros longitudinales ocupados con el asa adquieren temperaturas muy elevadas. Por lo tanto, esos fierros longitudinales no pueden ser ocupados en la implementación, ya que pueden causar daño a las cañerías. Este problema se solucionó distribuyendo el circuito de cañerías sobre la armadura de tal forma que ninguna cañería quedara solidaria con uno de esos fierros longitudinales, pero esto ocasionó que el circuito de cañerías no quedara con una distribución uniforme. Lo lógico dice que la etapa de soldar las asas a la armadura debe hacerse antes de implementar la armadura con el

circuito de cañerías, teniendo los fierros longitudinales el tiempo suficiente para poder enfriarse, pero como se dijo en el punto 2, las armaduras en terreno son escasas, entonces por lo general, una vez terminado el proceso de soldar las asas a la armadura, la grúa levanta la armadura y la coloca en la perforación, entonces no existe ese tiempo que se necesita para que la armadura sea implementada.

- Implementación de los anclajes.

1. El principal problema que se presentó en la implementación de los anclajes, corresponde a lo limitado que es el diámetro de la perforación y por ende el espacio libre que deja el anclaje de cables para poder introducir las cañerías. Bajo este inconveniente se generaron dos problemas a resolver. El primero corresponde a la limitación en el diámetro de la cañería que se iba a introducir, y el segundo a la limitación en el radio de giro que debía realizar la cañería en la parte inferior para formar el retorno del circuito. Lo primero se resolvió mediante una investigación de las posibilidades existen en el mercado con el fin de elegir la cañería de diámetro adecuado. El segundo se resolvió diseñando el retorno en "U" mediante un fitting de codo en 90° y forzando la tubería para generar toda la curva. Para esto fue necesario solicitar el aumento del diámetro de perforación que se estaba ocupando (diámetro interior 9 cm), con el fin de obtener el mayor espacio libre. Finalmente se logró contar con un diámetro interior de 12 cm, lo que permitió realizar el retorno de la manera explicada.

Un segundo problema se presentó en la limitación de espacio y complejidad que existe en la salida del anclaje a través de la PE, y en donde se coloca la cabeza del anclaje. La figura 2.23 muestra la cabeza del anclaje apoyada en la pared de la PE.



Figura 2.23 Cabeza de anclaje utilizada en proyecto Beauchef Poniente.

Para efectos de la investigación, se utilizaron vigas de apoyo para los tres niveles de anclaje, evitando perforar las PE. La utilización de estas vigas surge del impedimento de perforar las PE debido a la incertidumbre que se tenía en la ubicación exacta de las cañerías del circuito instalado en la armadura, por ende, se evitó la perforación utilizando una viga de apoyo y colocando los respectivos anclajes directamente en el suelo. Las figuras 2.24 y 2.25 muestran la viga de apoyo como también la salida y entrada del circuito de cañerías instalado en los anclajes.



Figura 2.24 Vista frontal viga de apoyo.



Figura 2.25 Vista lateral viga de apoyo.

2.4.2 MCP para la implementación de las PE.

La idea es ir en busca de una metodología que integre las actividades constructivas originales de una PE con las actividades expuestas y presentadas en este trabajo de título y que nacieron de las metodologías constructivas previas, ya sea en la MCT, MCD o en la MCA. En consideración de lo anterior, se propone una metodología constructiva en base a etapas de desarrollo, en donde cada una tiene un objetivo específico y que en conjunto todas buscan una implementación eficiente ocasionando el menor retraso posible.

A continuación se señalan las etapas que componen la metodología constructiva propuesta (MCP) para la implementación de las PE.

Etapas de diseño:

Uno de los principales problemas observados en la implementación de la PE fue sin duda el tener que adaptarse a una forma de operar y a un cuerpo de armadura con una distribución de sus fierros fija o ya establecida. Entonces se ve necesaria la inclusión de una etapa de diseño de la PE, que sin lugar a duda ya existe, en conjunto con la implementación, con el fin de tomar en cuenta factores como la colocación de las asas de izaje, la necesidad de una armadura compuesta por solo un cuerpo, distribución de la armadura longitudinal en forma recta, continua y cómoda para la instalación del circuito de cañerías flexible, etc.

La idea de realizar una etapa de diseño en conjunto con la implementación corresponde a apoyarse en el concepto de "Constructabilidad" (Constructability) (Wright, Obrien & Kreitzberg, 1994). Este concepto define la técnica como un sistema para conseguir una óptima integración del conocimiento y experiencia constructiva en las operaciones de planificación, ingeniería y construcción. Orientado a tratar las peculiaridades de la obra y las restricciones del entorno con la finalidad de alcanzar los objetivos del proyecto.

La etapa de diseño conjunto debe tener lugar en la etapa de diseño conceptual y de diseño de la entibación, etapas que son propias de todo proyecto de construcción, y que además es en donde con mayor eficiencia se puede incidir en los costos del proyecto (Paulson B. 1976).

Etapa de implementación:

La implementación realizada en las PE fue materializada en terreno, esto originó una serie de problemas, algunos productos del acotado espacio con el que se contaba y otros debido a la rapidez con que las actividades debían ser ejecutadas. Es por esta razón, que la etapa de implementación que se propone en la MCP, busca realizar los trabajos en un espacio donde se cuente con la instrumentación necesaria y suficiente para llevar a cabo un trabajo de calidad. Un lugar para la implementación de las PE, por ejemplo, puede ser una bodega, en donde se realicen, en conjunto, el armado completo de la armadura de la PE y la implementación de esta. Así se puede lograr obtener un trabajo que amalgame los procesos involucrados logrando además una ejecución continua de ellos.

A modo de ejemplo, una forma de programación para organizar el proceso constructivo, en la etapa de implementación, puede ser a través de una programación rítmica (continuidad de las actividades), la que ejecuta las actividades en forma continua, es decir, una tras otra, y permite encontrar cuáles son las actividades que demandan mayor cantidad de mano de obra dependiendo de la rapidez que necesite el proyecto. A modo explicativo, se expone en la figura 2.26 un esquema de cómo sería una programación rítmica para la etapa de implementación. El eje de las abscisas representa el tiempo "t" en intervalos según sea necesario (horas, semanas, meses, etc.), el eje de las ordenadas corresponde a lo que se está construyendo, en nuestro caso la implementación de pilas de entibación "PE". Dependiendo del plazo del proyecto, es que se obtiene la velocidad o demanda de construcción "m", por ejemplo, si en un tiempo $t = 30$ días se deben tener 6 PE construidas, entonces la demanda de ese proyecto es de $m = 0,20$ PE/día ó 1 PE cada 5 días. Por ende, en 5 días se deben ejecutar todas las actividades para implementar una PE (fabricación de la armadura, implementación y chequeo). El largo "L" de cada actividad corresponde al tiempo que se demora la actividad en ejecutarse. La programación rítmica permite organizar la cantidad de mano de obra necesaria para cada instante del proyecto. Por ejemplo, si vemos la figura 2.26, en un instante se estarán ejecutando 6 actividades correspondientes a armado de armadura al mismo tiempo, como también en un instante de tiempo se estarán ejecutando 4 actividades de implementación al mismo tiempo, y los mismo para la actividad de chequeo (3 al mismo tiempo). Conociendo la cantidad de mano de obra que demanda cada actividad se puede obtener la cantidad total de mano de obra para cada instante del proyecto.

Las tareas a considerar en la etapa de implementación son las siguientes:

- Armado de armadura de la PE.
- Implementación de la armadura de la PE mediante el circuito de cañerías flexibles.
- Chequeo de presión al circuito de cañerías y verificación de implementación.

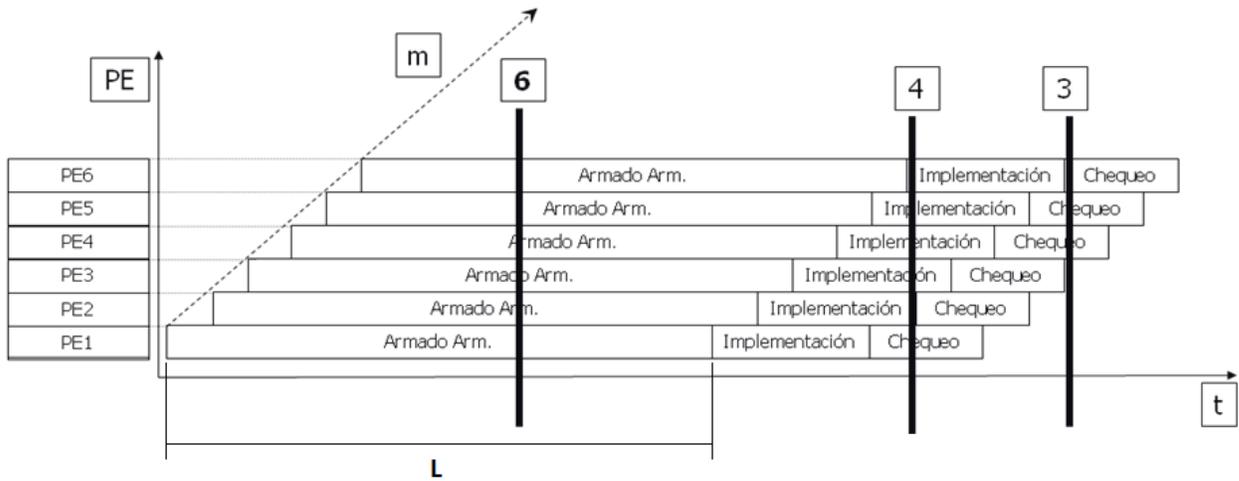


Figura 2.26 Programación rítmica propuesta.

Etapa de construcción:

Al realizar el armado e implementación de la PE en bodega o en un lugar específico se busca independizar las tareas propias de la implementación de las actividades originales de construcción de una PE, así se evita ocasionar una demora en la construcción, logrando prefabricar en un ambiente productivo y controlado.

Al lograr separar, en cierto modo, la construcción de la PE con la implementación se obtiene una etapa de construcción que consta básicamente de las actividades propias de una PE original, es decir, sin implementar. Esto es:

- Excavación.
- Colocación de armadura.
- Hormigonado.
- Retiro de camisa.

En la figura 2.27 se ilustra un diagrama secuencial de la MCP para la implementación de las PE:

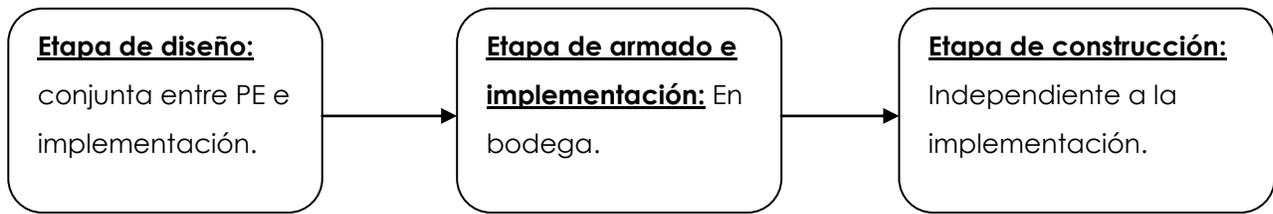


Figura 2.27 Diagrama de la MCP para la implementación de las PE.

La forma de implementación propuesta para las PE corresponde a una configuración que mezcla el circuito helicoidal con el circuito vertical. Las razones de utilizar esta configuración del circuito de cañerías son las siguientes:

- Tramo con implementación helicoidal: Un circuito helicoidal permite una implementación más eficiente de la PE, introduciendo una mayor longitud de cañería. Además, como el circuito recorre todo el perímetro de la PE según su armadura de refuerzo, entonces el intercambio de calor entre la PE y el suelo se realiza abarcando toda la dirección radial y angular de la PE para un plano de corte transversal de la PE. Esto no se cumple en una distribución del circuito de forma vertical, ya que la distribución de cañería que se puede implementar no permite tener una densidad uniforme que permita un intercambio de calor entre la PE y el suelo de manera uniforme en un mismo plano transversal de la pila. La figura 2.28 ilustra un tramo ΔL de PE implementada de manera helicoidal.

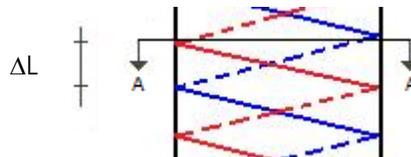


Figura 2.28 Tramo con distribución helicoidal.

La figura 2.29 ilustra cómo sería el intercambio de calor entre la PE y el suelo para el tramo ΔL de PE. Cabe destacar que la dirección de las flechas indican un flujo de calor que va de la PE al suelo, lo que en un sistema geotérmico corresponde a una condición de verano.

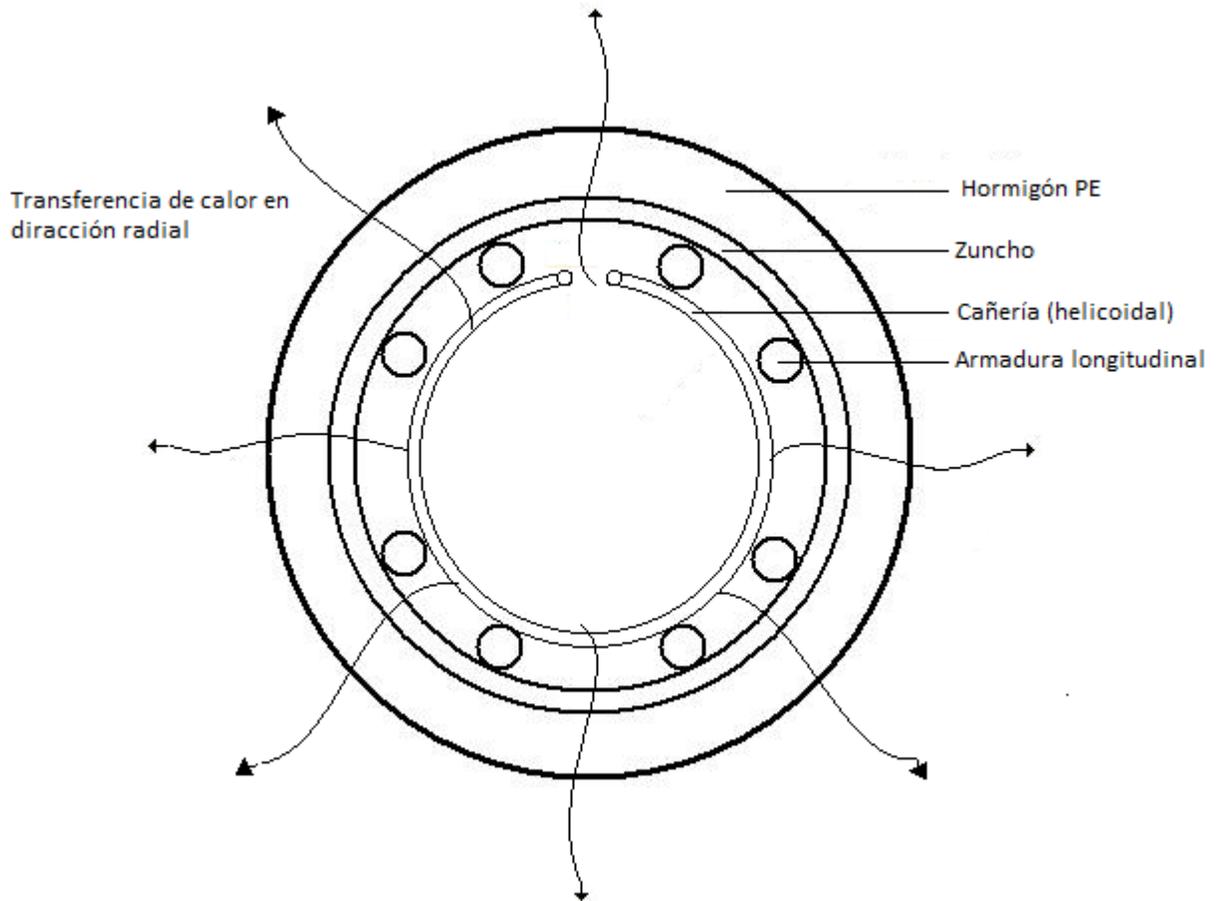


Figura 2.29 Corte A-A (vista transversal) del tramo helicoidal.

A diferencia de lo anterior, con una implementación del circuito de cañerías de manera vertical, induciría un intercambio de calor entre la PE y el suelo variable en para un mismo plano de corte. Esto se debe a que la distribución de las cañerías no es uniforme, por ende se tiene mayor densidad de cañerías en un sector que en otro.

- Tramo con implementación vertical: Una implementación vertical exclusivamente en la zona de paso de los anclajes, permite disminuir el riesgo que las cañerías sean perforadas o dañadas por estos.

La figura 2.30 representa un esquema en elevación la forma de implementación propuesta para las PE, en donde:

- Zona de implementación helicoidal: corresponde a colocar el circuito de cañerías flexibles en la armadura en forma helicoidal.

- Zona de implementación vertical: Corresponde a colocar el circuito de cañerías flexibles en la armadura en forma vertical.
- Zona de anclaje: Indica el lugar físico en donde el anclaje atraviesa la PE.

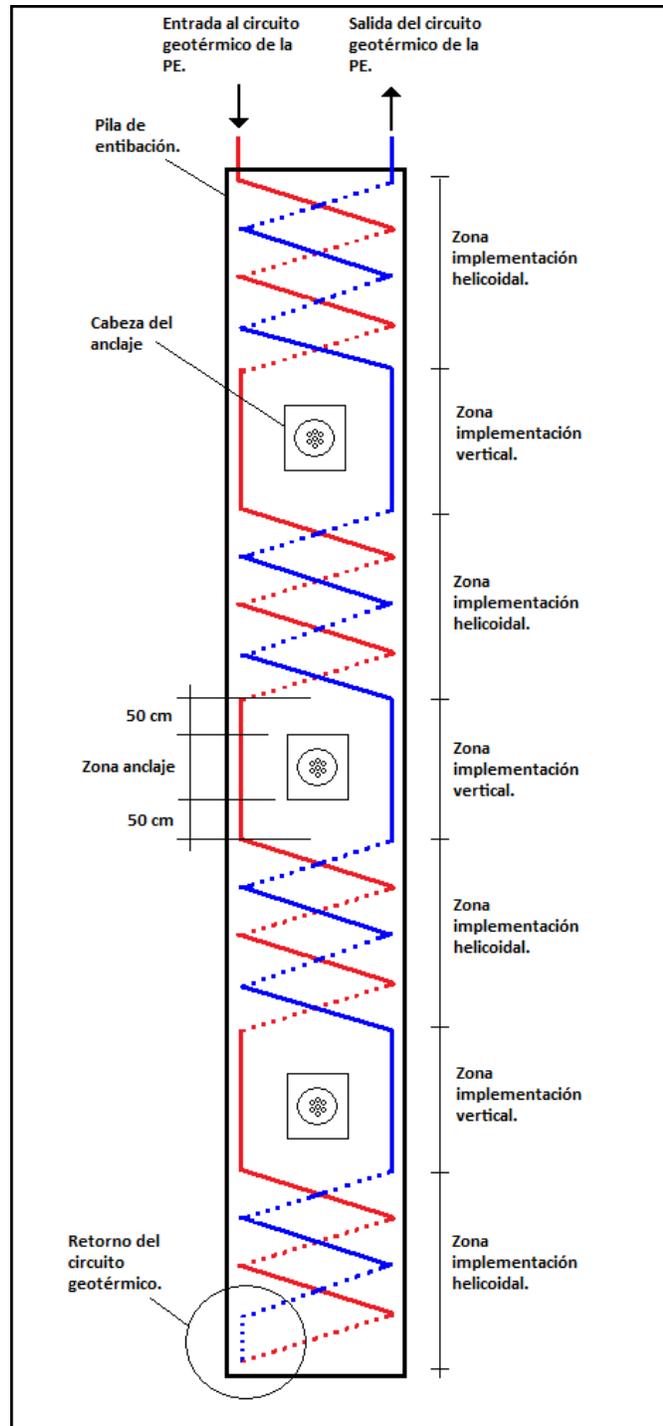


Figura 2.30 Esquema para la Implementación propuesta de las PE

- Retorno del circuito geotérmico: Se refiere al sector donde el circuito de cañerías instalado en la armadura realiza el retorno y la cañería empieza a subir por la armadura de la PE. En la figura 2.31 se muestra el tipo de retorno a emplear.



Figura 2.31 Retorno utilizado en la implementación helicoidal.

2.4.3 MCP para la implementación de anclajes.

Al igual que para la implementación de las PE se propone una MC basada en etapas, las que buscan la integración más eficiente entre la metodología constructiva original de los anclajes y la metodología constructiva de implementación.

Como el objetivo principal de dividir las actividades en etapas es el agrupar actividades relativamente similares, es decir, asignar a una misma etapa procesos que deben realizarse simultáneamente bajo condiciones similares tanto en la forma de ejecutarse como en la seguridad y comodidad que demandan, se hace necesaria que la MC esté compuesta por 3

etapas, una de diseño del anclaje en conjunto con el diseño del circuito de cañerías, otra etapa de armado del anclaje junto a la implementación y una última etapa de construcción del anclaje. A continuación se detalla cada etapa de la MCP.

Etapa de diseño en conjunto:

La necesidad de una etapa previa a la construcción e implementación de los anclajes se hace necesaria al observar que la mayoría de los problemas ocurridos en la MCA eran 100 % evitables bajo un diseño previo de los anclajes en conjunto con la implementación del circuito de cañerías flexibles, es por esta razón que se propone una primera etapa conceptual y de diseño que tiene por objetivo principal encontrar el camino correcto entre la construcción de la pila con la implementación. El principal problema a solucionar corresponde al fitting de conexión en la punta interior del circuito donde se debe generar la "U", si bien en esta investigación el problema se solucionó fácilmente adaptado un fitting de codo de 90° gracias al aumento del diámetro de la perforación, lo mejor sin duda para un proyecto de gran envergadura que abarque un número mucho mayor de implementaciones, es diseñar este fitting en base a la restricción de perforación que se tiene, con la finalidad de generar interés de algún proveedor en construir un fitting que cumpla las necesidades tanto físicas como geométricas.

Etapa de armado e implementación:

Si bien el armado de los anclajes, en este caso compuestos por cables, es una tarea que se desarrolló en bodega, la implementación de estos no fue así. Por el contrario, esta actividad fue materializada en terreno, por ende se generaron todos los problemas e inconvenientes que fueron descritos. La etapa de armado e implementación sugiere que tanto el armado del anclaje como la implementación de este se realice en bodega, con el fin de contar con la comodidad necesaria y además agregar a las actividades una tarea de chequeo del circuito, propios de instalaciones, aptas para la prefabricación.

Etapa de construcción:

Al realizar la implementación en bodega, la construcción del anclaje quedaría sin ninguna alteración a no ser por la necesidad de sacar la tubería en forma independiente al anclaje. Para esta etapa se proponen 3 formas de enfrentar la salida del anclaje:

1. Etapa de construcción con alternativa de hombro de hormigón armado.

Para entender la MCP con hombro de hormigón armado es necesario primero explicar qué es un hombro de anclaje (de hormigón armado o acero), conocido también como apoyo. Este corresponde a una estructura que proporciona un apoyo seguro y firme a la cabeza del anclaje para que esta reaccione sobre él y se transfiera así la carga de los cables a la PE. Se utiliza principalmente en muros pantalla para evitar el punzonamiento que pueda provocar la cabeza del anclaje en el paño del muro. La figura 2.32 muestra un hombro de anclaje tipo de hormigón armado.



Figura 2.32 Hombro de apoyo utilizado en anclaje de una Pila.

El objetivo principal de colocar un hombro de anclaje es proporcionar al circuito de cañerías un acceso independiente que el del anclaje. La figura 2.33 muestra un esquema propuesto de un hombro de anclaje.

Hombro de hormigón armado tipo

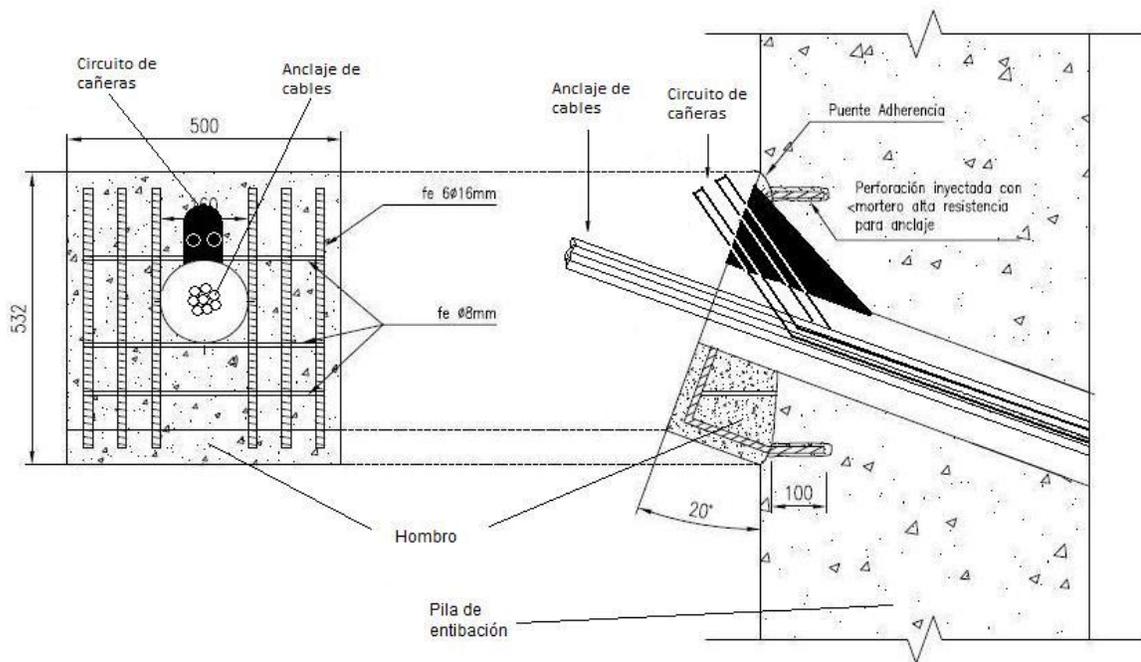


Figura 2.33 Hombro de hormigón armado. (Pilotes Terratest S.A., 2010)

Entonces con la utilización de este hombro de anclaje, la etapa de construcción estaría definida como sigue:

- Construcción del hombro.
- Perforación de hombro y PE.
- Picado del hombro para extracción de tubería independiente al anclaje
- Inyección lechada.
- Instalación anclaje.
- Tensado del anclaje

El realizar el hombro de anclaje de hormigón armado, si bien es una solución a la extracción de las cañerías por la cabeza del anclaje, implica una demora en la realización de esta, ya que al construir el hombro se debe esperar el tiempo necesario para que este adquiera la resistencia adecuada que sea capaz de soportar la compresión del anclaje. Es por este motivo que nace una segunda propuesta de fabricar el hombro de anclaje de acero.

2. Etapa de construcción con alternativa con hombro de acero.

La función del hombro de anclaje de acero es idéntica a la del hombro de hormigón armado, la única diferencia está en su forma de construcción y en la implicancia que tiene en la construcción del anclaje. La figura 2.34 hace referencia a un hombro de acero tipo. Y la forma en que las cañerías saldrían de este.



Figura 2.34 Apoyo de anclaje utilizado en esta ocasión como apoyo para la viga.

La figura 2.35 esquematiza la salida de las cañerías y el anclaje a través del hombro de acero.

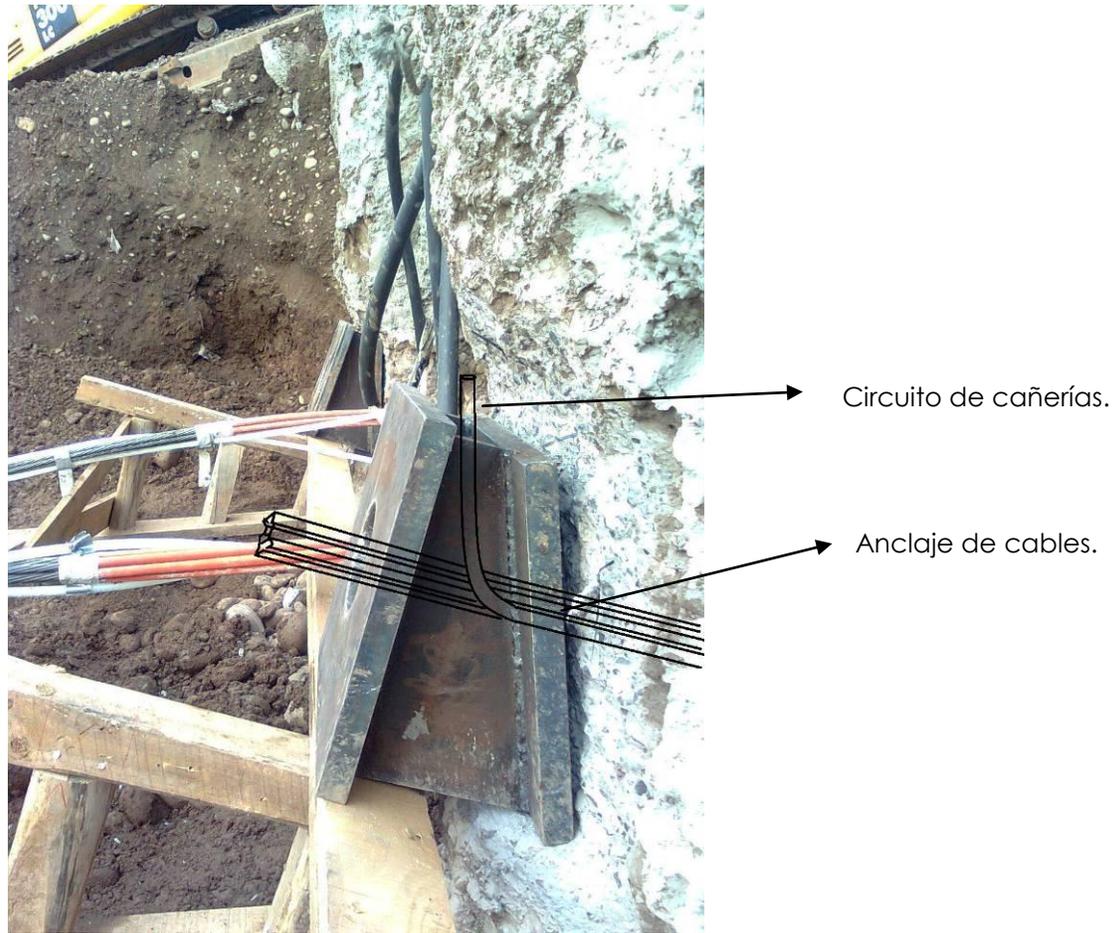


Figura 2.35 Esquemática propuesta para salida de cañerías mediante hombro de acero.

Al utilizar este tipo de hombro la etapa de construcción queda de esta forma:

- Perforación.
- Inyección lechada.
- Instalación anclaje.
- Preparación de la pila para colocar hombro. Esta actividad solo busca dar una superficie de contacto plana entre la PE y el hombro de acero.
- Colocación del hombro.
- Tensado.

3. Etapa de construcción con alternativa sin hombro de anclaje.

Al realizar las actividades en terreno se pudo observar que es factible la extracción de las cañerías sin la utilización de hombro, mediante una previa preparación de la pila en la zona adyacente a la perforación del anclaje. Las figuras 2.36 y 2.37 esquematizan una idea de lo propuesto.



Figura 2.36 Esquematación frontal de propuesta sin hombro de anclaje.

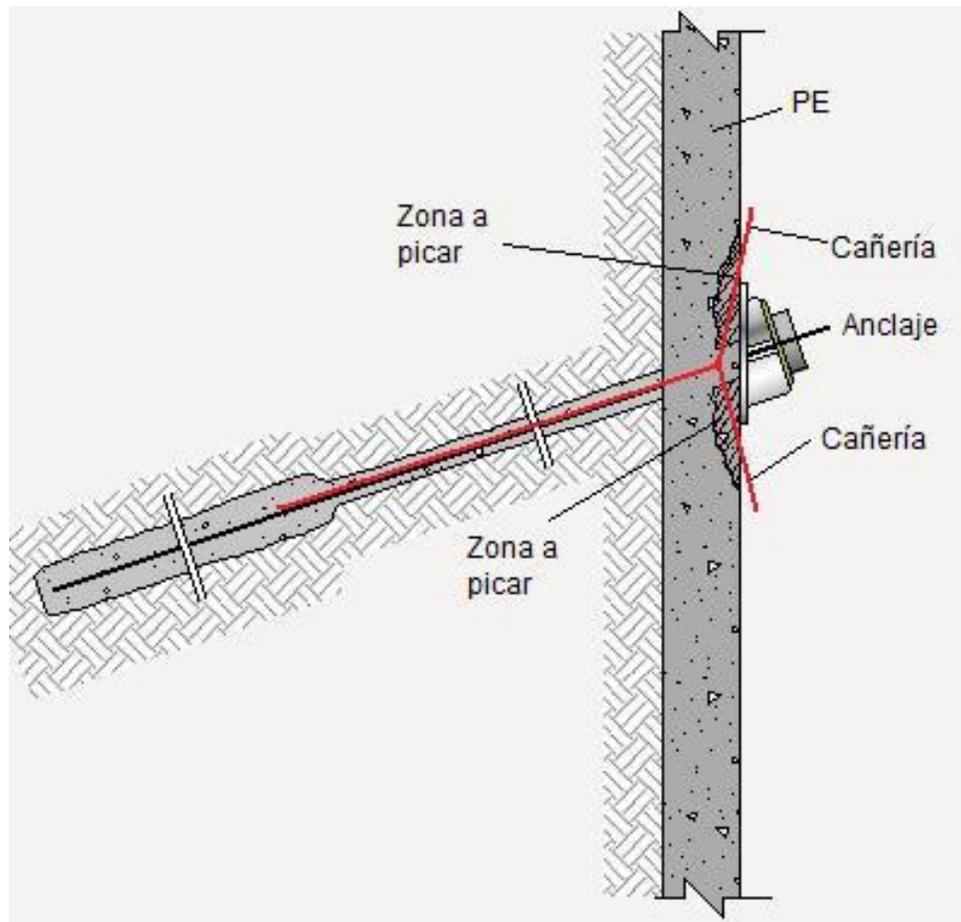


Figura 2.37 Esquematización lateral de propuesta sin hombro.

La zona a picar es mínima y solo debe permitir la salida de las cañerías entre la PE y la cabeza del anclaje, este paso puede materializarse mediante el uso de una galleta la que le daría mayor precisión y menor intervención.

Con esta propuesta la etapa de construcción queda como sigue:

- Perforación.
- Picado o galletado de zona de la PE para la salida de las cañerías.
- Inyección de lechada en el anclaje.
- Instalación del anclaje.
- Tensado.

La figura 2.38 ilustra un diagrama de las MCP para la implementación de los anclajes, en donde se indica además la alternativa elegida.

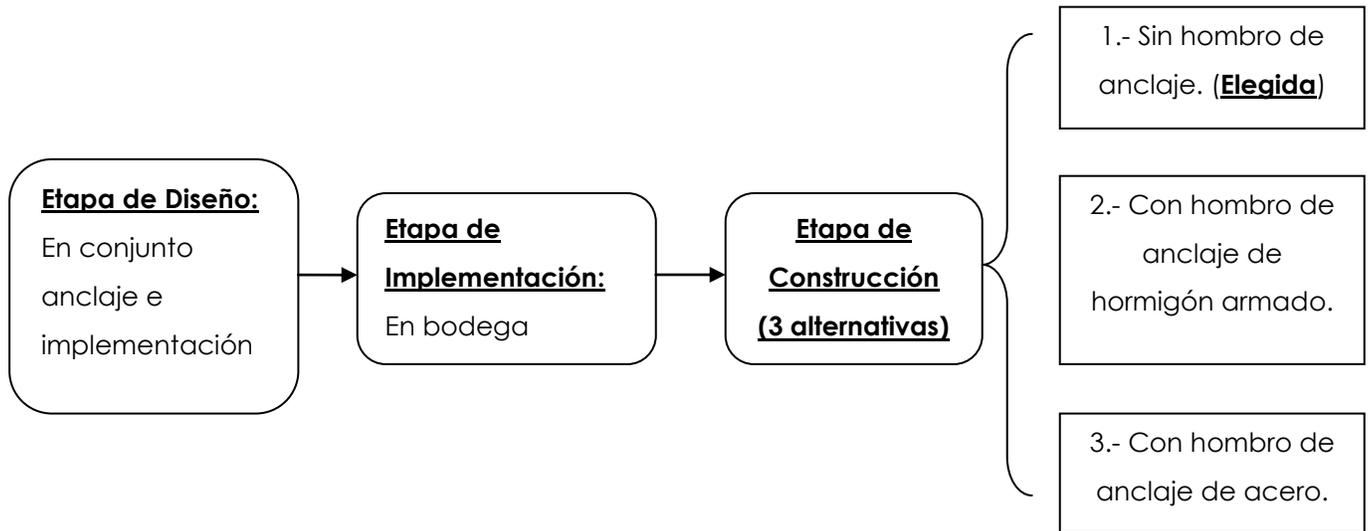


Figura 2.38 Diagrama de la MCP para la implementación de los anclajes.

2.5 Análisis de los tiempos de ejecución de las distintas MC discutidas.

Las metodologías propuestas anteriormente para la implementación de las PE y los respectivos anclajes tienen por objetivo principal el lograr una implementación de cada elemento en forma eficiente, entendiéndose por eficiencia el tratar de inducir el menor retraso posible de la construcción de una PE y los anclajes originales, además de buscar una implementación de calidad que asegure el funcionamiento correcto del circuito geotérmico. Por esto, además de la factibilidad constructiva que otorga la metodología constructiva propuesta tanto para las PE como para los anclajes, se analizan los tiempos de ejecución de cada metodología constructiva estudiada.

1. Tiempos de ejecución para las MC en PE.

Los tiempos de ejecución para cada MC estudiada se muestran mediante una carta Gantt en las figuras 2.39 y 2.40, las que consideran una semana laboral de lunes a viernes y cada día laboral de 9 hrs de trabajo. Bajo estas consideraciones se tiene lo siguiente:

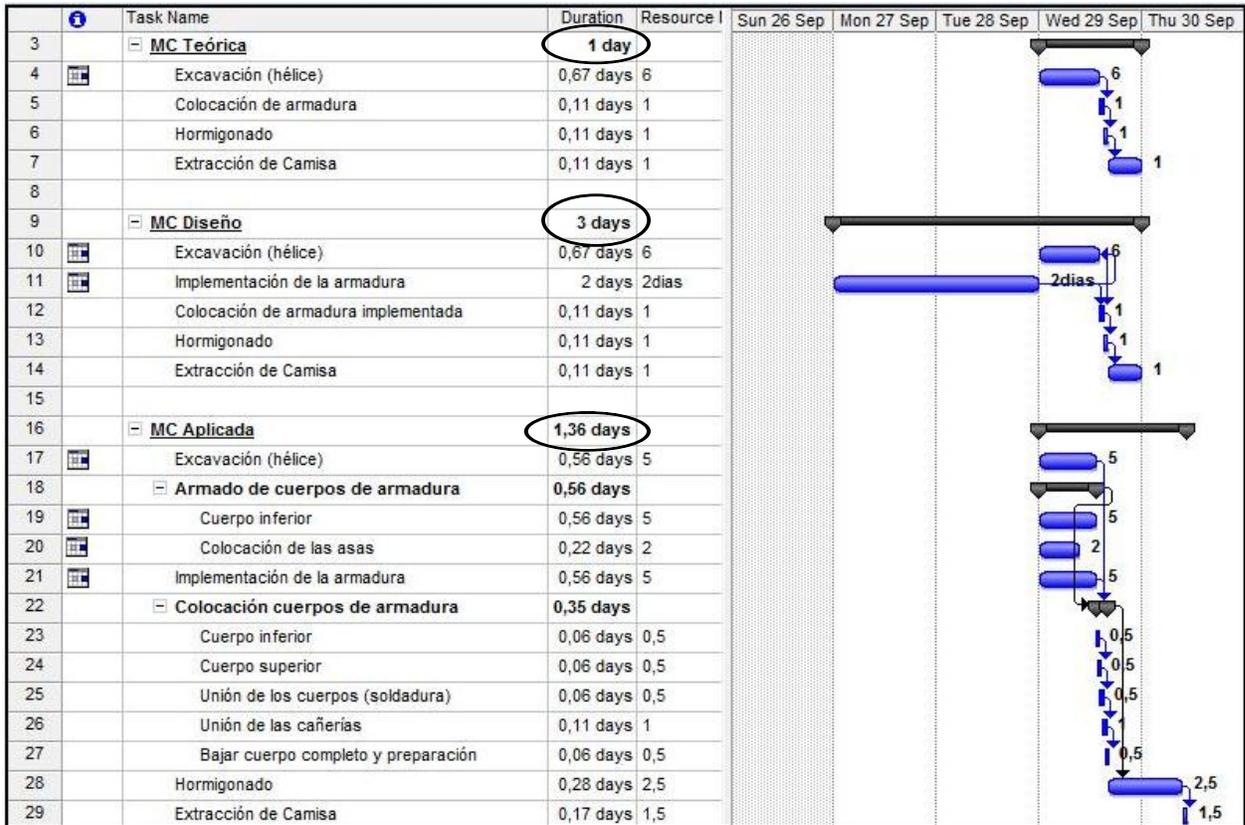


Figura 2.39 Carta Gantt para MCT, MCD y MCA para la implementación de PE.



Figura 2.40 Carta Gantt de la MCP para la implementación de PE.

En las figuras 2.39 y 2.40 se indican en un círculo negro los tiempos de ejecución de cada MC identificada. Si se observa la duración de la MC propuesta se identifica que el tiempo que predomina es el correspondiente a construcción de la PE. Esto se debe a que se independizó la implementación de la PE de la construcción, por ende no existe en terreno un tiempo relacionado a la implementación de la PE mediante el circuito de cañerías flexibles. Sin embargo, los tiempos de hormigonado y extracción de la camisa si se ven afectados en comparación con los tiempos identificados en la MCD, esto debido al cuidado que se debe tener en la ejecución de estas etapas para evitar dañar el circuito de cañerías instalado en la armadura de la PE.

En la tabla 2.1 se puede observar que la MCP tiene una menor duración que la MCA, es decir, bajo la división de las actividades mediante etapas de diseño, de armado y de construcción, se logra una implementación de la PE más eficiente en tiempo, costos monetarios y de mejor calidad.

Tabla 2.1 Tiempos de ejecución en cada MC estudiada.

MC	Tiempo de ejecución [día]
Teórica	1,00
Diseño*	3,00
Aplicada	1,36
Propuesta**	1,12

* = 2 días previos para la implementación

** =Tiempo de etapa de diseño no se considera y la relación entre etapa de implementación y construcción deja de ser término-comienzo.

2. Tiempos de ejecución para las MC de los anclajes.

Al igual que para la PE se presentan los tiempo de ejecución para cada MC estudiada mediante una carta Gantt, la que considera una semana laboral de lunes a viernes y cada día laboral de 9 hrs de trabajo.

La figura 2.41 muestra mediante unos círculos la duración de la MCT, MCD y MCA, identificándose los tiempos de 5.83 días para la MCT, 7.83 días para la MCD y de 5.65 días para la MCA. Se puede destacar que la diferencia de 2 días que se observa entre las MCT y la MCD corresponde a los dos días que se proyectaron en el diseño, para realizar la implementación como una actividad anterior a la construcción de los anclajes. Una vez realizada la implementación se observó que este tiempo de implementación era menor a dos días, dando origen a la duración de la MCA de 5,65 días que se indica en el tercer círculo de la figura 2.43.

En forma análoga se puede observar que finalmente la duración de la MCA es menor que la duración de la MCT identificada. Es decir, el tiempo de construcción real de un anclaje era menor al investigado para la MCD, además la implementación era posible realizarla en forma paralela a las actividades de construcción, por ende se traslapaban en forma lineal, en donde era posible realizar una actividad que pertenecía a la construcción, como la perforación, mientras se realizaba la implementación de los anclajes. Es por este motivo que en la MCA se registró una duración menor que la MCD, aun cuando la MCA contempla tanto la implementación como la construcción de los anclajes.

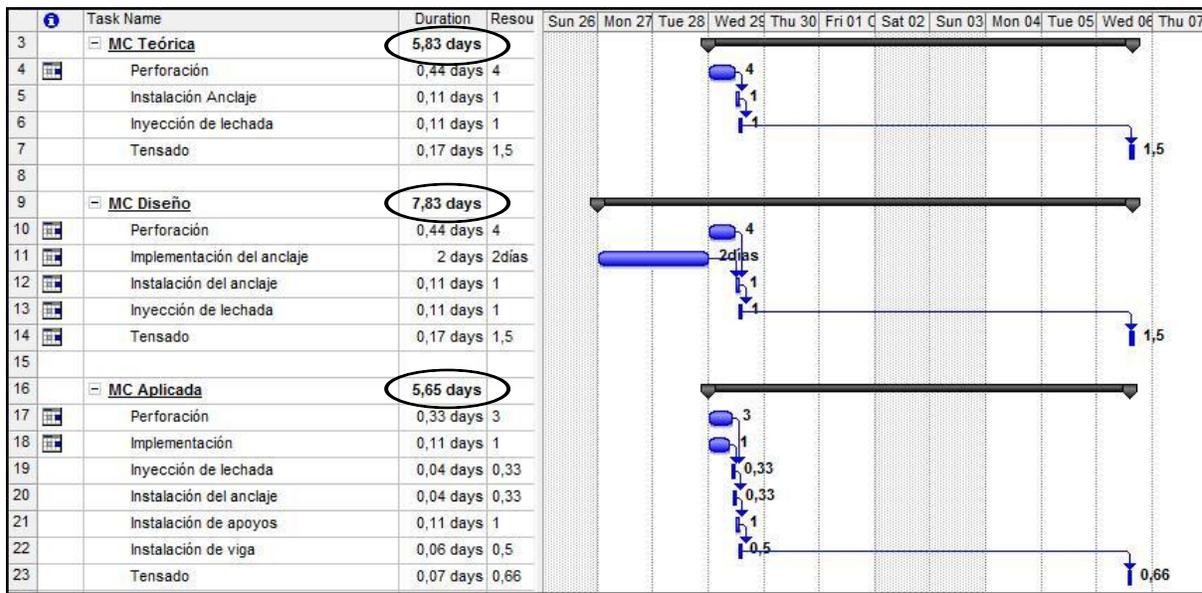


Figura 2.41 Tiempos de ejecución para las MCT, MCD, MCA en los anclajes.

Cabe señalar que la actividad correspondiente al tensado del anclaje se realiza 5 días después de colocado este.

La figura 2.42 indica en círculos los tiempos de duración de cada alternativa de MCP para la implementación de los anclajes mediante el circuito de cañerías flexibles, es decir, se identifican los tiempos de duración de la MCP con hombro de anclaje de hormigón armado, MCP con hombro de anclaje de acero y el tiempo de duración de la MCP sin hombro de anclaje.

Se puede observar que la MCP que arroja el menor tiempo de duración corresponde a la alternativa de realizar un hombro de anclaje de acero con una duración de 5.63 días. Sin embargo, un tiempo de duración muy parecido o cercano arroja la alternativa de implementación sin hombro de anclaje con un tiempo de duración de 5.7 días. La elección final de la MCP se complementará con el análisis de costos asociados a cada una de las alternativas presentadas.

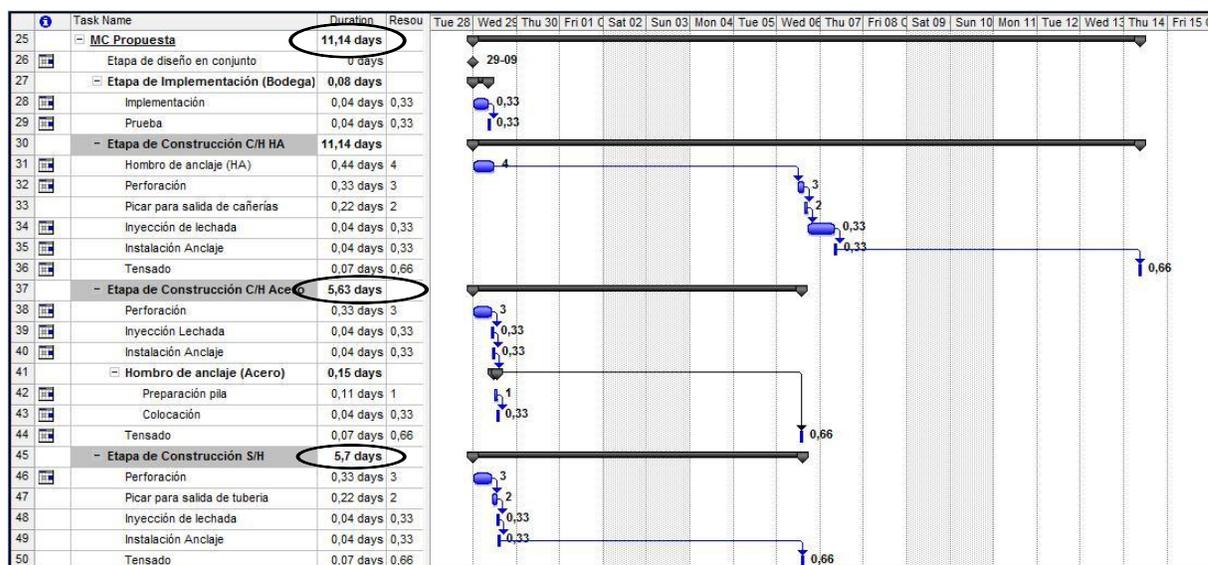


Figura 2.42 Tiempos de ejecución de la MCP para la implementación de los anclajes.

La tabla 2.2 resume los tiempos de duración de cada MC identificada en el estudio. Es posible observar que para las tres alternativas que se proponen para la implementación, es decir, la MCP utilizando hombro de anclaje de hormigón armado, MCP utilizando hombro de anclaje de acero y la MCP sin utilizar hombro de anclaje, la que genera la menor duración es la MCP utilizando el hombro de anclaje de acero, sin embargo, no es posible aún decidir cuál será la MCP final que se recomendará, ya que esta decisión debe tomar en cuenta los costos asociados.

Tabla 2.2 Tiempos de ejecución para cada MC estudiada para la implementación de los anclajes.

MC	Tiempo de ejecución [día]
Teórica	5,83
Diseño*	7,83
Aplicada	5,65
P HHA **	11,14
P HA ***	5,63
P SH ****	5,70

* = 2 días previos para la implementación

** = P HHA, propuesta con hombro de hormigón armado.

*** = P HA, propuesta con hombro de acero.

**** = P SH, propuesta sin hombro.

En conclusión, y en base a la factibilidad constructiva y a los tiempos de ejecución identificados, la MCP para las PE corresponde a una MC en base a etapas (diseño, armado e implementación, y construcción), separando la implementación de la armadura, de la construcción de la PE. Además, la distribución del circuito de cañerías flexibles solidario a la armadura debe ser helicoidal y vertical solo en las zonas de los anclajes. Para los anclajes, al igual que las PE, se propone una implementación basada en etapas (diseño, armado e implementación, y construcción), sin la necesidad de utilizar un hombro de anclaje para la salida de las cañerías.

Para efectos de la investigación, se supuso que las causas que originan un posible giro de la armadura, como la mala confección de los cuerpos de armadura en terreno y el retiro de la camisa mediante giros sucesivos de esta, son perfectamente evitables pudiendo llevar este error a cero. Sin embargo, se propone un estudio estadístico detallado que evidencie el porcentaje total de armaduras que quedan giradas y por ende, el circuito de cañerías flexibles sería en la eventualidad dañado en la perforación del anclaje. La figura 2.43 es un esquema del estudio propuesto, en donde se deberían seguir los siguientes pasos:

1. Pintar de dos colores distintos las barras longitudinales cercanas a la cañería. En el ejemplo se pintan las barras de la izquierda de rojo y las de la derecha de azul.
2. Registrar el giro (hacia la izquierda o derecha) de las barras una vez terminado el retiro de la camisa.
3. Calcular el porcentaje total de barras pintadas que quedan dentro de la zona de perforación del anclaje.

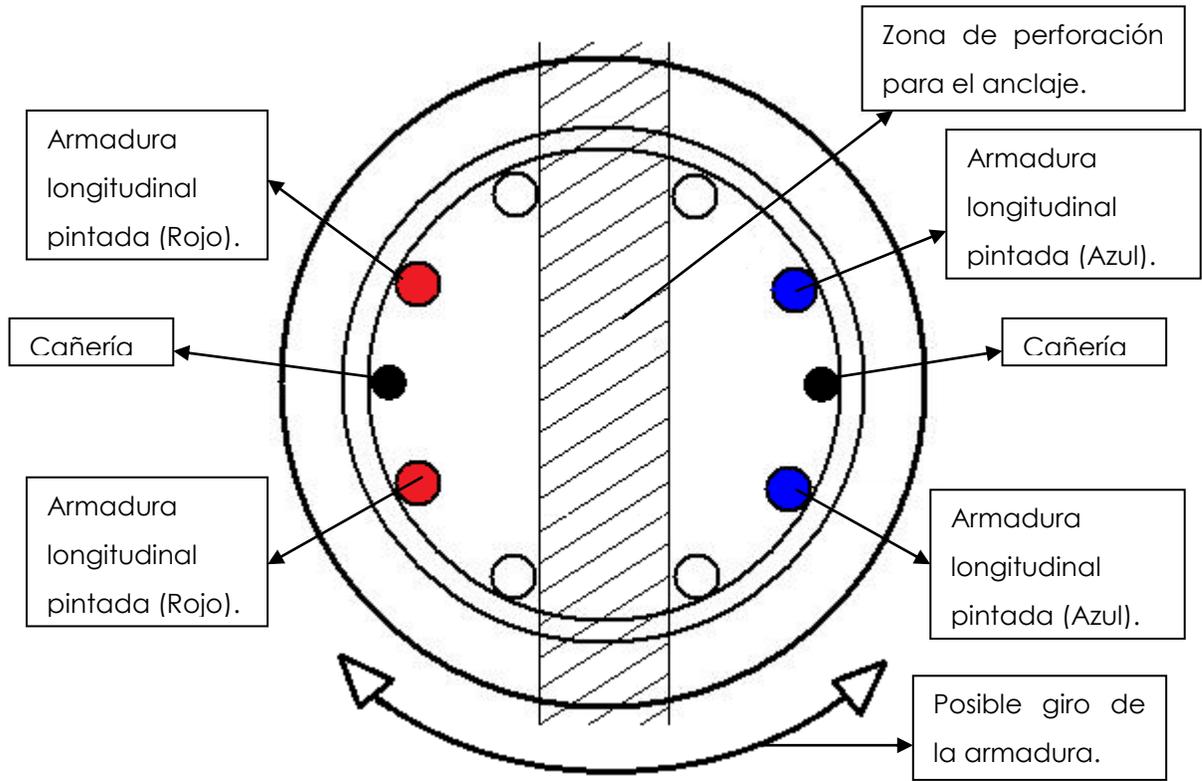


Figura 2.43 Detalle de estudio del giro de la armadura propuesto.

3. BALANCE TERMICO (BT)

La mayoría de los sistemas diseñados para el aprovechamiento geotérmico realizan el intercambio de calor directamente con el suelo, por ejemplo los sistemas horizontales, ya sean paralelos, en serie o helicoidales, van directamente instalados en la tierra. De esta forma el fluido que recorre las cañerías entrega o adquiere calor hacia o desde la tierra a través de las paredes de la cañería. El sistema geotérmico instalado y estudiado en este trabajo, realiza el intercambio de calor, pasando además de por las paredes de la cañería, por el hormigón de las PE o de los anclajes. Por este motivo, que uno de los supuestos que busca comprobar este estudio corresponde a que la temperatura de las PE adquieren la temperatura del suelo. Para esto se instalaron sensores térmicos a distintas profundidades tanto en las PE como en el suelo, con el fin de realizar una comparación de estos.

La figura 3.1 ilustra cuatro curvas de temperatura de un suelo correspondiente al hemisferio norte, según la época del año en función de la profundidad. Este tipo de función es la que se espera obtener del estudio, tanto para la PE como para el suelo.

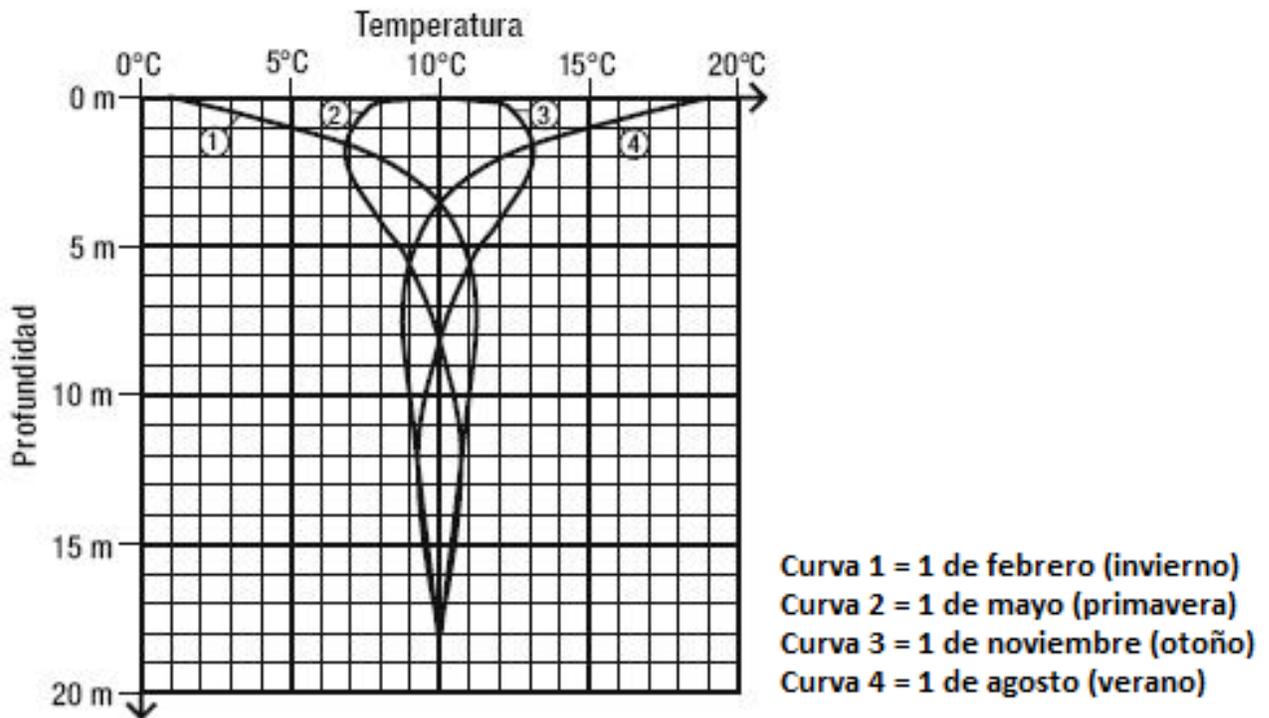


Figura 3.1 Curvas de temperatura del suelo en función de la profundidad (REHAU, 2008).

Uno de los parámetros más importantes en el diseño de una instalación geotérmica corresponde a la longitud total de perforación necesaria (GEOMAD. 2011 y Girod Geotermia 2008), este parámetro depende principalmente de conocer con exactitud las propiedades térmicas del suelo en donde se emplazará el sistema geotérmico diseñado. Las propiedades de interés corresponden a la conductividad y resistencia térmica del suelo. Esta conductividad se expresa por medio del coeficiente de conductividad del terreno que determina la cantidad de calor necesaria por m^2 para que atravesando durante la unidad de tiempo 1 metro de material se obtenga una diferencia de $1^\circ C$ entre las dos caras. Sus unidades en el S.I. son $W/m \cdot K$ ($J/(s \cdot m \cdot ^\circ C)$).

Para el caso de un sistema geotérmico, la conductividad térmica de interés corresponde a la conjunta entre todos los materiales presentes en el intercambio de calor que se realizará. A esta conductividad la llamaremos conductividad térmica efectiva del sistema geotérmico, y se identificará mediante la letra " λ_{ef} ". Para encontrar el valor de la conductividad térmica efectiva y también el de la resistencia térmica efectiva se desarrolló un ensayo llamado test de respuesta térmica. A modo de referencia, algunos valores que se manejan en la literatura de conductividad térmica son los siguientes:

- Conductividad térmica para pozo vertical (Sharqawy, "et al". 2009): 2,154 W/mK
- Resistencia térmica para pozo vertical (Sharqawy, "et al". 2009): 0,315 mK/W
- Conductividad térmica de la arcilla con arena fin, suelo de una instalación geotérmica (Zuloaga & Sierra, 2009): 1,1 a 3,5 W/mK
- Conductividad térmica arcilla (NCh 853. Of.1991): 0,93 W/mK
- Conductividad térmica arena (NCh 853.Of.1991): 0,58 W/mK
- Conductividad térmica de la grava (NCh 853.Of.1991): 0,81 W/mK
- Conductividad térmica del hormigón normal (NCh 853.Of.1991): 1,63 W/mK

El esquema representado en la figura 3.2 ilustra el desarrollo del capítulo de balance térmico realizado. El que básicamente contempla 3 áreas de desarrollo. El perfil térmico de la PE, el perfil térmico del suelo y el test de respuesta térmica.

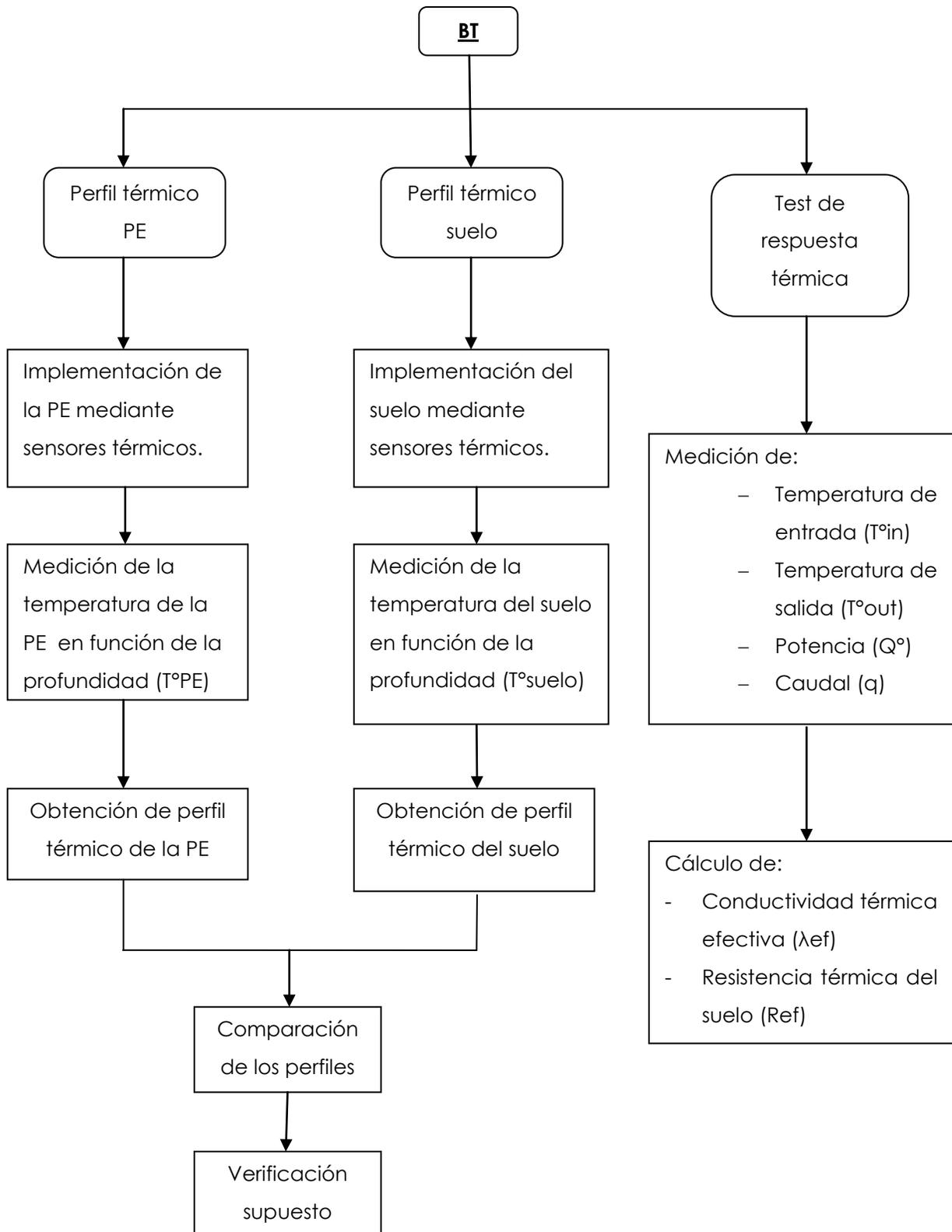


Figura 3.2 Esquema de desarrollo del capítulo de balance térmico.

3.1 Perfil térmico de una PE.

La obtención del perfil térmico para una PE se realizó mediante la implementación de las PE101 y PE100 con sensores térmicos colocados en forma solidaria a la armadura y distribuidos a distintas profundidades. Con el registro de estos sensores se obtuvo un perfil térmico de la PE. Un posible daño de los sensores térmicos hizo posible la lectura de solo 6 de un total de 14 sensores colocados entre las dos PE. El registro de los datos se realizó en condiciones actuales de la obra, las que corresponden a un avance de la edificación que aun mantiene casi la totalidad de las PE con la superficie exterior libre. Es por este motivo que el promedio de las temperaturas obtenidas entre un rango de profundidad de las PE de 16 m y 26 m fue de 7,4°C.

3.1.1 Implementación de las PE mediante sensores térmicos

La implementación de la PE se realizó colocando sensores térmicos en distintos puntos de la armadura. Estos puntos no son equidistantes debido a que la variación de temperatura es mayor en los niveles más cercanos a la superficie, entonces fue necesario colocar una densidad de sensores mayor en la parte superior de la armadura.

En las figuras 3.3 y 3.4 se observan los sensores térmicos colocados en la armadura de la PE.



Figura 3.3 LM35DZ, sensores de temperatura fijados a la armadura.

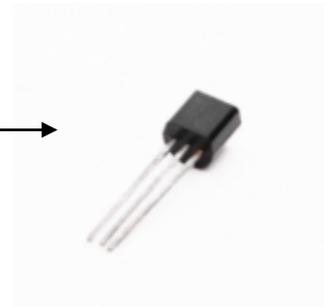


Figura 3.4 LM35DZ.(Casa Royal, 2011)

La implementación mediante sensores térmicos se realizó en las PE100 y PE101. La distribución de estos y la cantidad de sensores colocados en cada una de las PE se indica en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Distribución de los LM35DZ en PE 101 y PE 100.

<u>PE 101</u>		<u>PE100</u>	
LM35 DZ	Profundidad [m]	LM35 DZ	Profundidad [m]
1	0,5	12	16,5
2	1,2	13	20,0
3	2,2	14	26,5
4	3,2		
5	4,3		
6	5,2		
7	11,0		
8	15,0		
9	18,2		
10	22,7		
11	25,6		

La figura 3.5 ilustra la distribución de sensores térmicos implementados en la armadura de la PE101. De la misma forma, la figura 3.6 lo indica para la PE100.

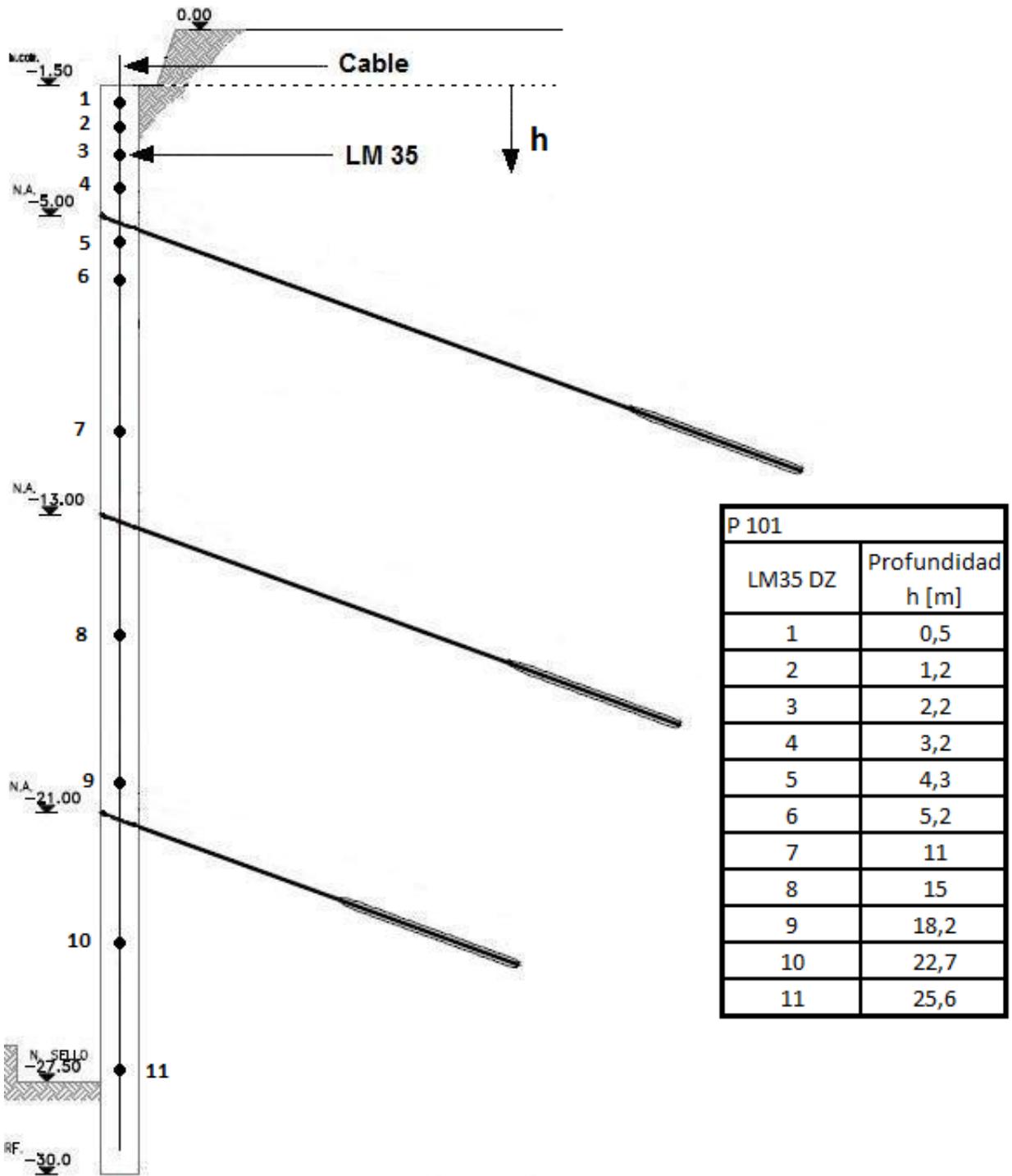


Figura 3.5 Esquema de ubicación de los sensores térmicos en PE101.

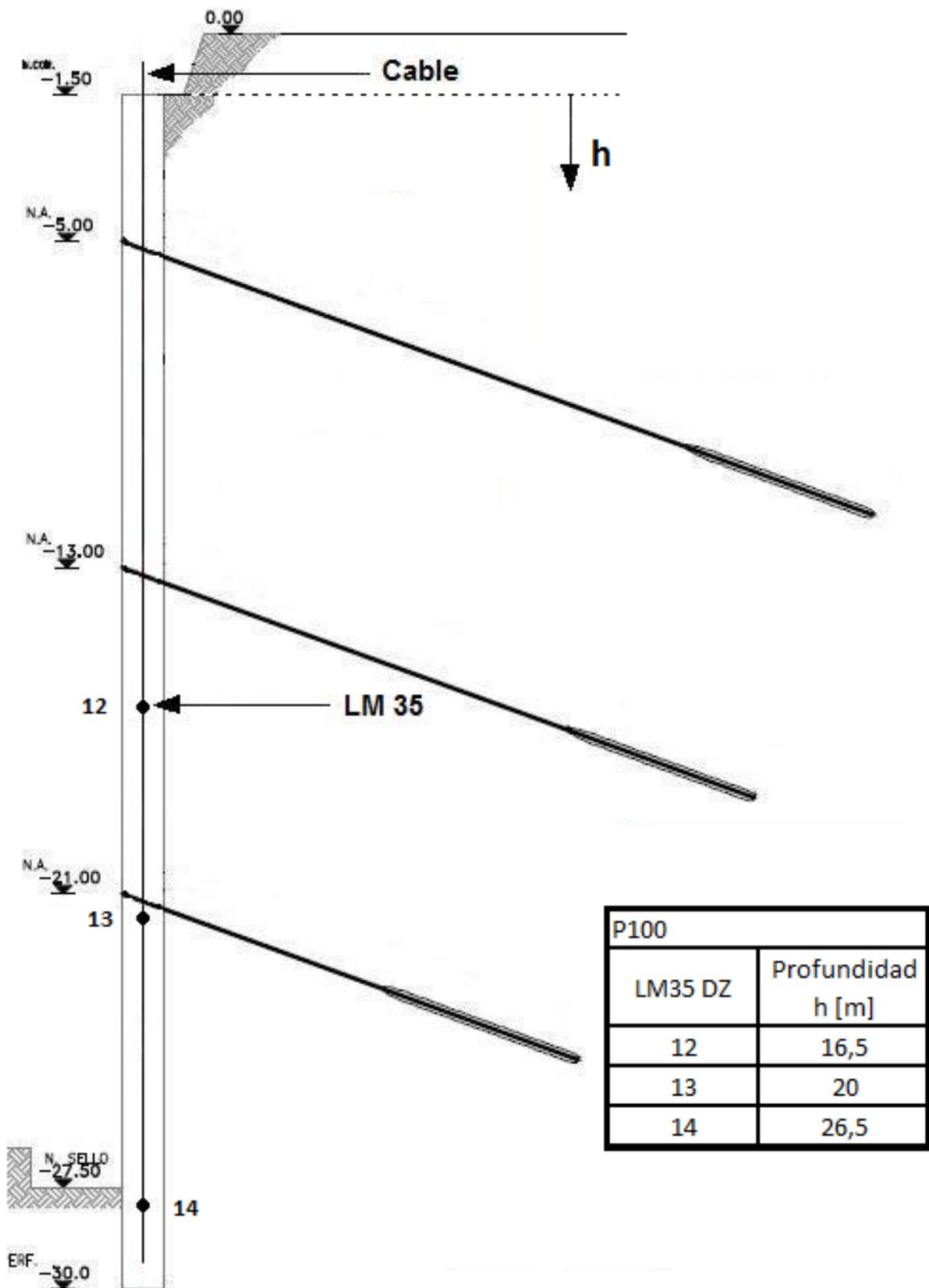


Figura 3.6 Esquema de ubicación de los sensores térmicos en PE100.

3.1.2 Resultados del perfil térmico de una PE

El registro de datos se realizó el día 02/09/2011, donde se obtuvo un registro en 6 de los 14 sensores colocados entre las dos PE. La hora de la toma de datos fue a las 13:00 con una T° ambiente de 22,5 °C. La tabla 3.2 indica las temperaturas registradas por los sensores térmicos (LM35 DZ) ubicados en la armadura de las PE 101 y PE100.

Tabla 3.2 Datos perfil térmico de la PE101 y PE100 día 02/09/2011

<u>PE101</u>			<u>PE100</u>		
LM35 DZ	Profundidad [m]*	Temperatura [°C]	LM35 DZ	Profundidad [m]*	Temperatura [°C]
1	0,5	---	12	16,5	6,4
2	1,2	---	13	20,0	7,0
3	2,2	---	14	26,5	8,8
4	3,2	---			
5	4,3	---			
6	5,2	---			
7	11,0	---			
8	15,0	---			
9	18,2	6,0			
10	22,7	6,8			
11	25,6	8,8			

* Profundidad referida desde la superficie de la PE, la que se encuentra a 1,5 m bajo el nivel 0 de terreno.

Los datos entregados por la tabla 3.2 corresponden a las temperaturas registradas por los sensores térmicos colocados de forma solidaria a la armadura de las PE. Solo se logró leer datos en 6 de los 14 sensores colocados, obteniendo una T° promedio entre los 16,5 y 26,6 m de 7,2°C para la PE101 y de 7,4°C para la PE100, y un promedio conjunto entre las dos PE de 7,3°C.

La condición actual de la obra, mantiene una cara de la superficie lateral de las PE expuesta al aire libre. Esta condición se ha mantenido por un periodo a la fecha (septiembre 2011) de aproximadamente 18 meses. Es por este motivo que las PE en estos momentos obedecen a una condición de superficie, y no de suelo. Esta condición debería cambiar una vez terminada la obra y cubierta la superficie libre de las PE, modificando las T° registradas.

La figura 3.7 ilustra la condición de superficie (área achurada) actual de las PE y que por ende afecta las temperaturas registradas.

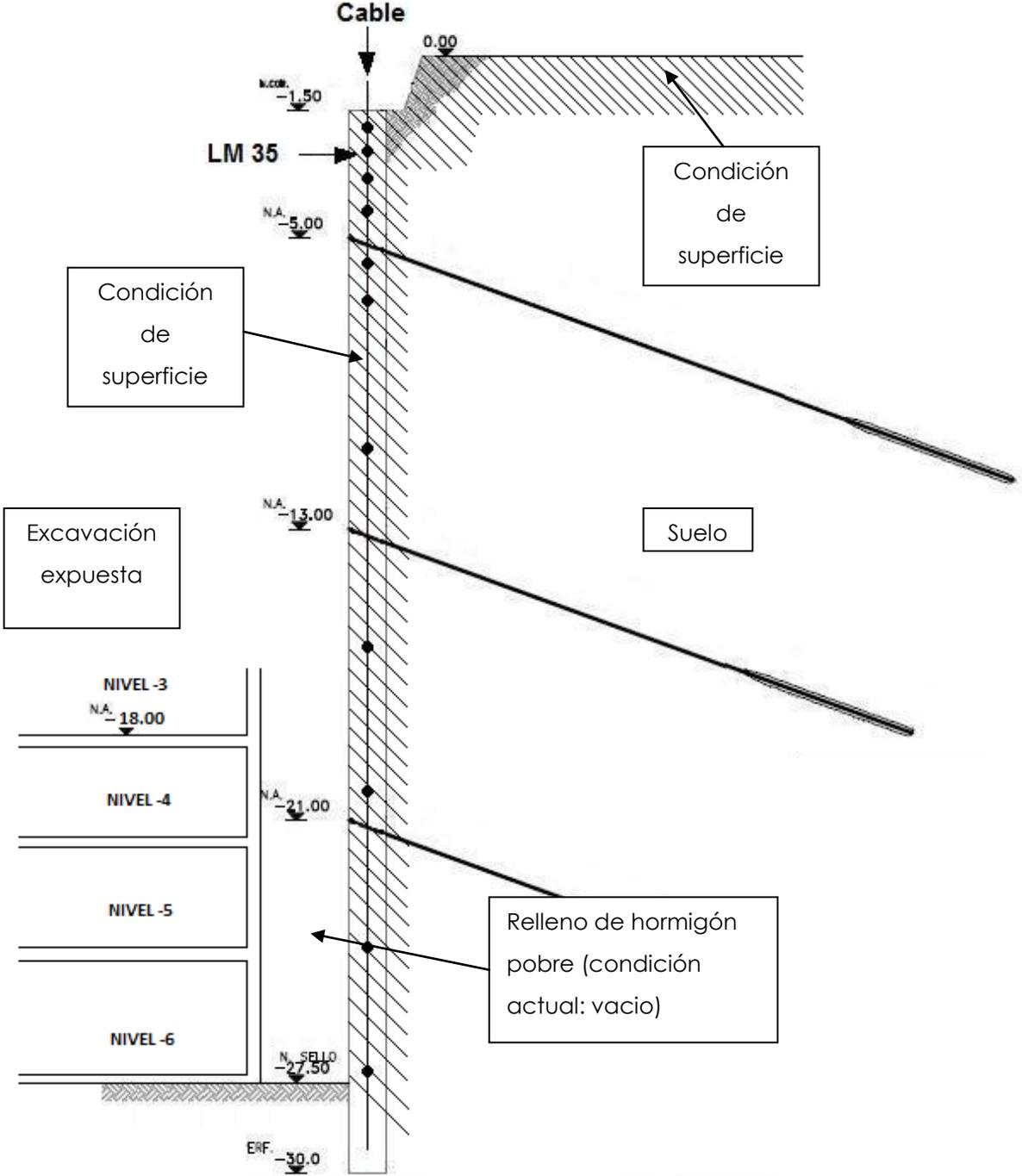


Figura 3.7 Condición de superficie.

3.2 Perfil térmico del suelo.

Con el objetivo principal de obtener un perfil térmico del suelo en función de la profundidad, se introdujeron en el suelo dos cables de 6 metros y con 8 sensores térmicos cada uno. La función de cada sensor térmico es registrar la temperatura que el suelo presenta a esa profundidad. De los registros obtenidos se comprobó que el promedio del suelo entre los 3 y 6 metros de profundidad es de aproximadamente 15°C.

3.2.1 Implementación para perfil térmico del suelo

La distribución de los sensores térmicos en cada cable se indica en la tabla 3.3. Esta profundidad está referida al nivel cero, es decir, al nivel de la superficie.

Tabla 3.3 Distribución de sensores térmicos en el suelo.

LM35 DZ	Profundidad [m]	
	Cable N°1 (lado sur)	Cable N°2 (lado norte)
1	0,5	0,5
2	1,0	1,0
3	1,5	1,5
4	2,0	2,5
5	3,0	3,5
6	4,0	4,5
7	5,0	5,5
8	6,0	6,0

La figura 3.8 esquematiza la situación final de los cables colocados en la excavación y por ende la distribución de los sensores térmicos que se realizó.

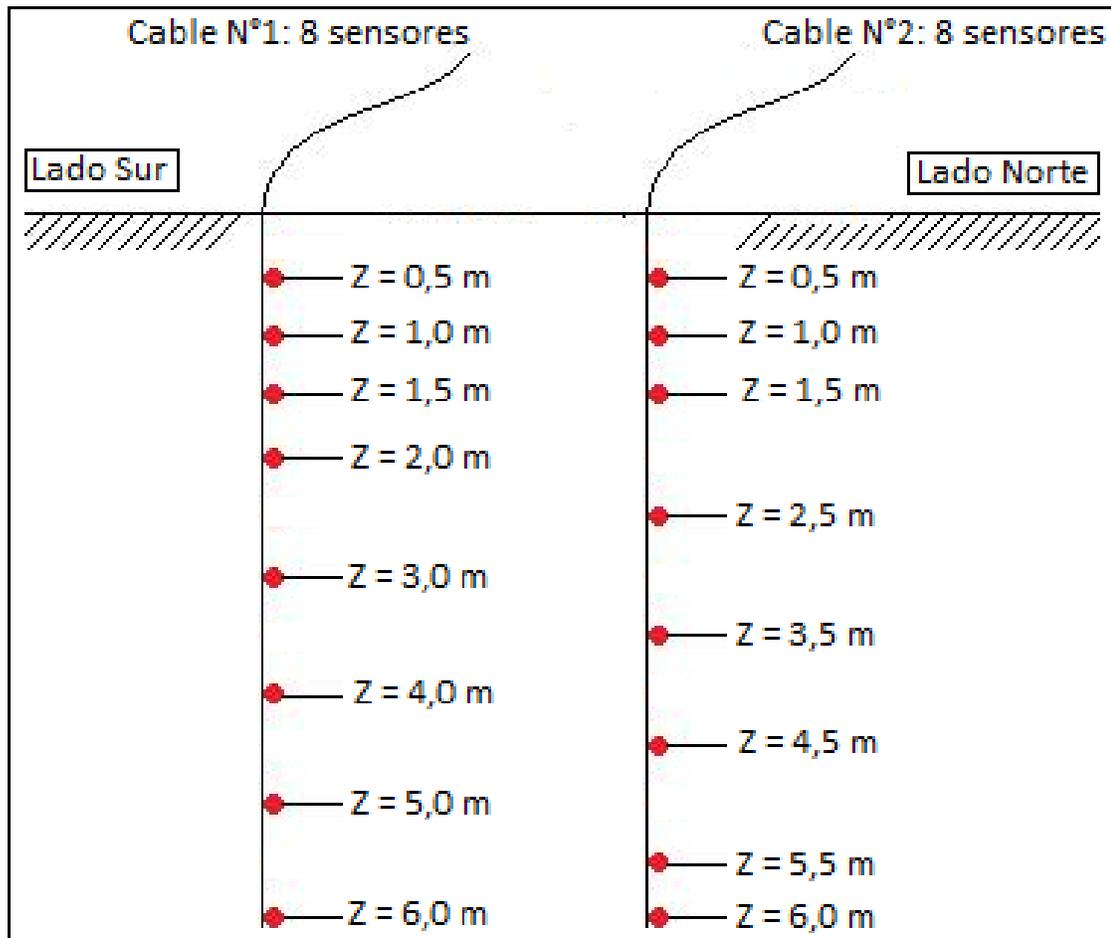


Figura 3.8 Esquema de la ubicación de los sensores térmicos en el suelo.

3.2.2 Resultados del perfil térmico del suelo

El registro de datos fue realizado durante dos periodos. El primero periodo corresponde a los días 09 y 23 de Junio de 2011, el segundo periodo corresponde a los días 31 de agosto y 01 de septiembre de 2011. En cada día se registró la temperatura de cada sensor térmico colocado en los cables.

Los datos obtenidos en cada medición son los siguientes:

Primera periodo:

- Registros día 09 de junio de 2011

Se registró una serie de datos en las siguientes condiciones:

Fecha: 09-06-2011

Hora: 17:05

T° ambiente [°C]: 16,3 °C

La tabla 3.4 entrega la serie del registro efectuado.

Tabla 3.4 Registro de datos N°1 de la temperatura del suelo.

Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
0,0	16,3	0,0	16,3
-0,5	11,2	-0,5	10,4
-1,0	12,8	-1,0	11,6
-1,5	13,9	-1,5	13,1
-2,0	14,1	-2,5	14,8
-3,0	15,4	-3,5	15,4
-4,0	15,8	-4,5	15,8
-5,0	16,3	-5,5	15,3
-6,0	15,6	-6,0	15,4

Temperatura promedio general [°C]= 14,2

Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 15,6

Las figuras 3.9 y 3.10 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

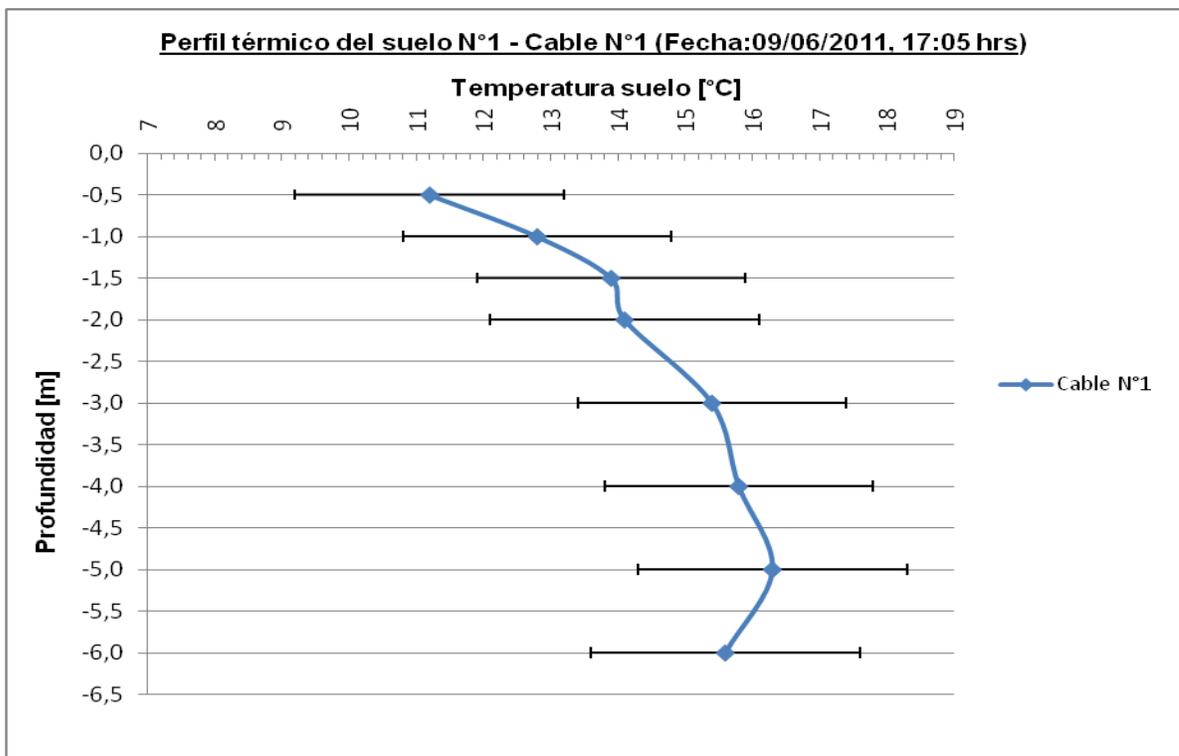


Figura 3.9 Perfil térmico cable N°1, registro N°1.

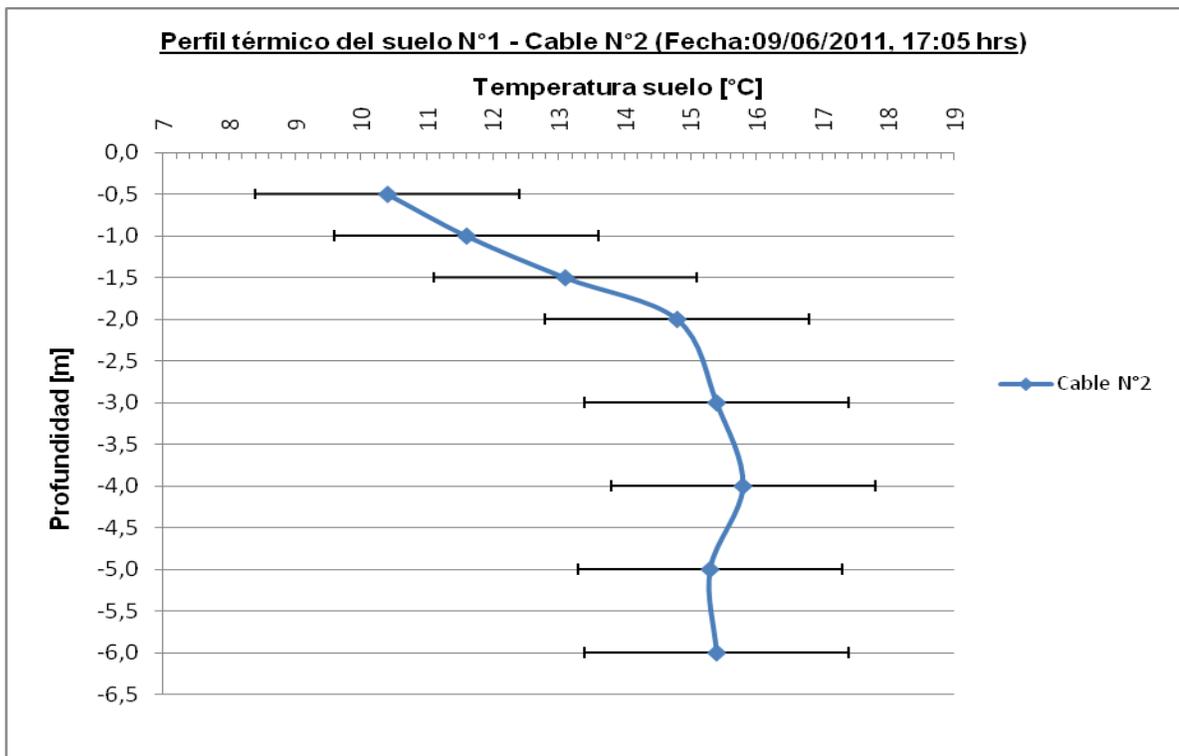


Figura 3.10 Perfil térmico cable N°2, registro N°1.

– Registros día 23 de junio de 2011

Se registraron dos series de datos para el mismo día en las siguientes condiciones:

Fecha: 23-06-2011

Hora: 9:45

T° ambiente [°C]: 9,2

La tabla 3.5 entrega la primera serie del registro efectuado en el día.

Tabla 3.5 Registro de datos N°2 de la temperatura del suelo.

Cable			
Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
0,0	9,2	0,0	9,2
-0,5	9,9	-0,5	8,9
-1,0	11,5	-1,0	10,4
-1,5	12,4	-1,5	12,1
-2,0	13,3	-2,5	14,2
-3,0	14,9	-3,5	15,1
-4,0	15,5	-4,5	15,7
-5,0	15,8	-5,5	15,2
-6,0	15,3	-6,0	15,3

Temperatura promedio general [°C]= 13,5

Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 15,4

Las figuras 3.11 y 3.12 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

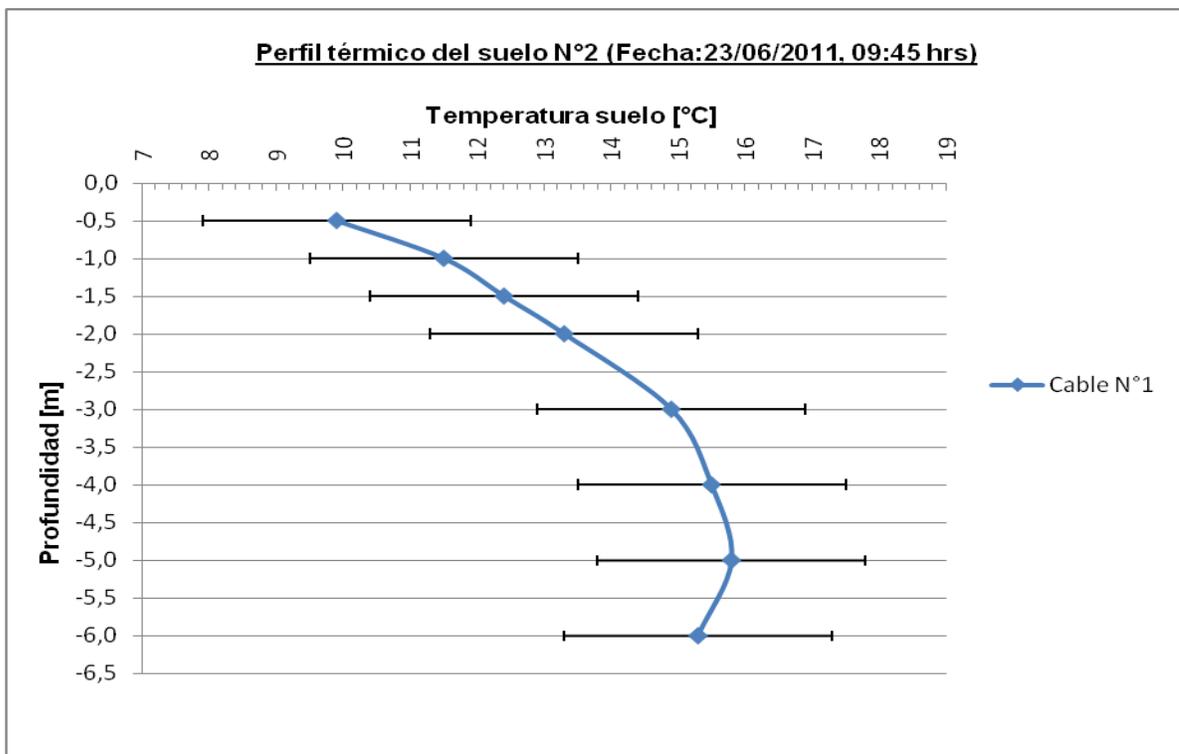


Figura 3.11 Perfil térmico cable N°1, registro N°2.

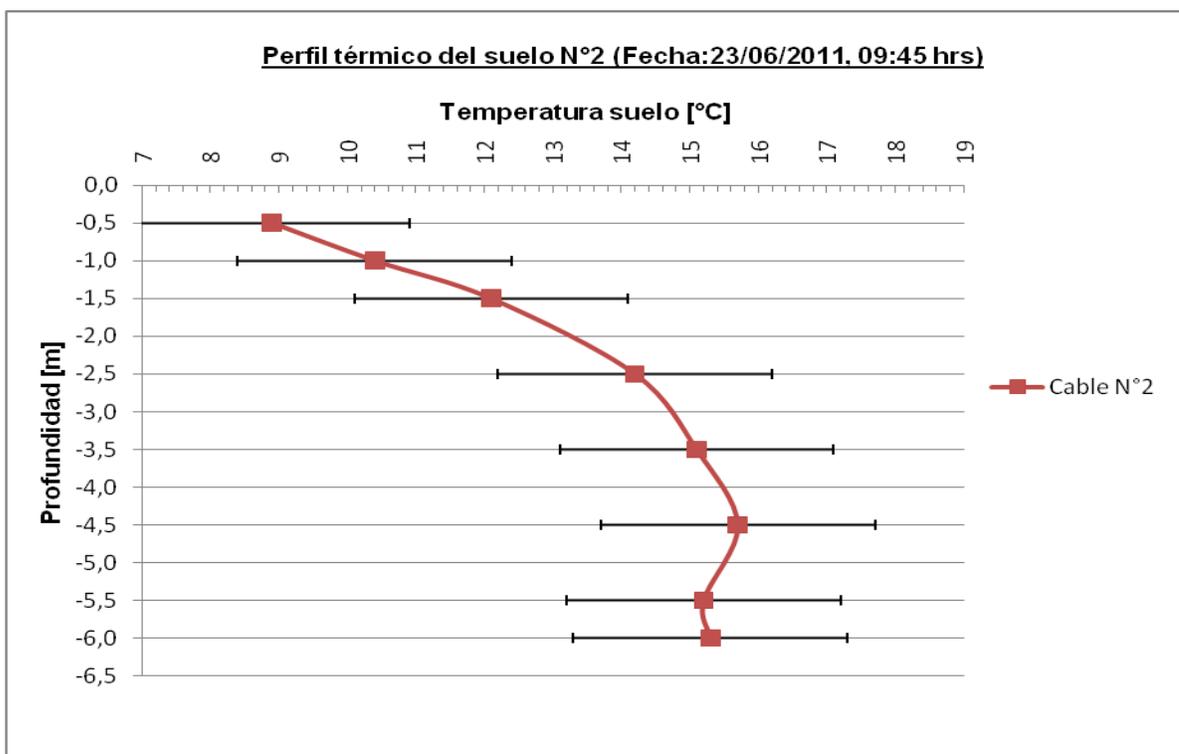


Figura 3.12 Perfil térmico cable N°2, registro N°2.

Fecha: 23-06-2011
 Hora: 12:45
 T° ambiente [°C]: 17

La tabla 3.6 entrega la segunda serie del registro efectuado en el día.

Tabla 3.6 Registro de datos N°3 de la temperatura del suelo.

Cable			
Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
0,0	17,0	0,0	17,0
-0,5	9,9	-0,5	9,0
-1,0	11,5	-1,0	10,4
-1,5	12,4	-1,5	12,1
-2,0	13,4	-2,5	14,2
-3,0	15,0	-3,5	15,2
-4,0	15,6	-4,5	15,5
-5,0	16,0	-5,5	15,2
-6,0	15,4	-6,0	15,3

Temperatura promedio general [°C]= 13,5
 Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 15,4

Las figuras 3.13 y 3.14 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

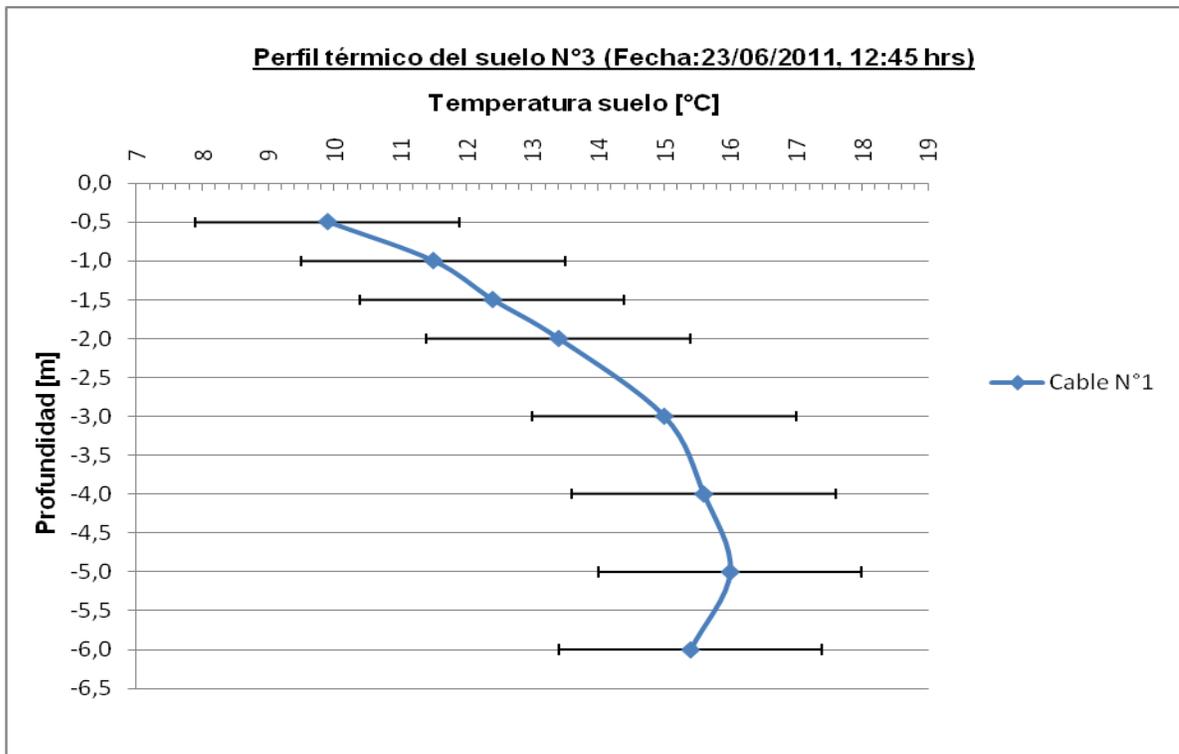


Figura 3.13 Perfil térmico cable N°1, registro N°3.

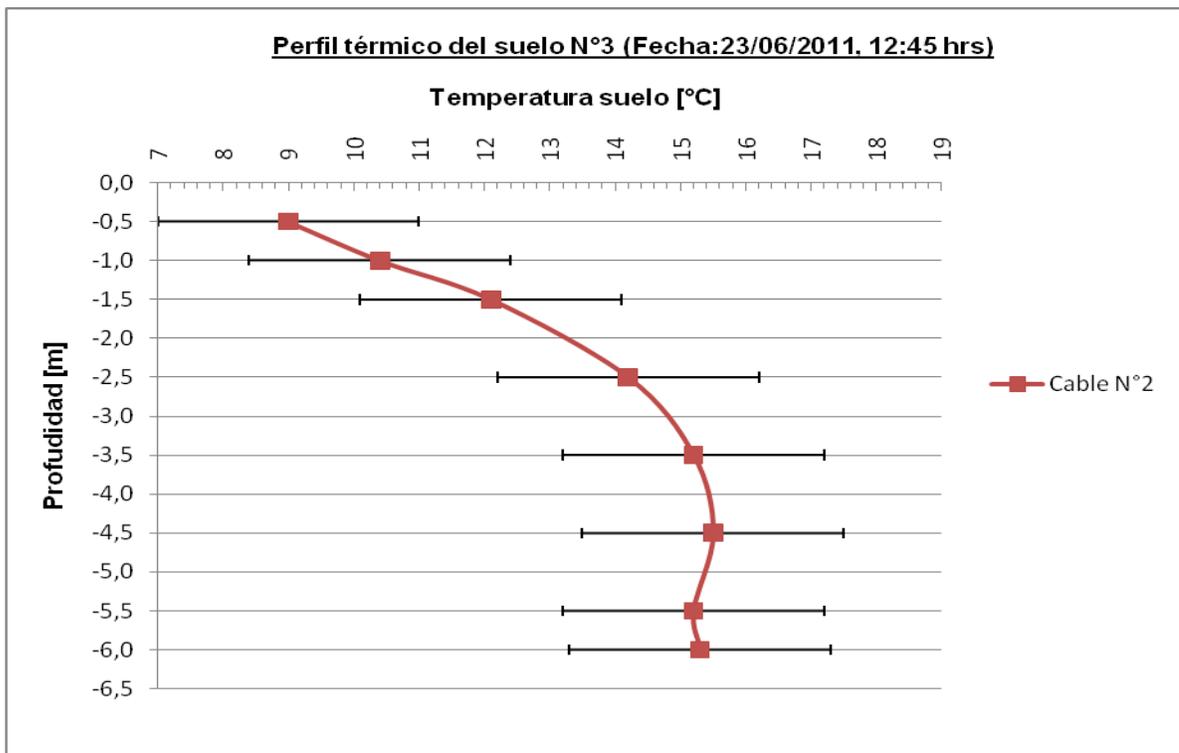


Figura 3.14 Perfil térmico cable N°2, registro N°3.

Segundo periodo:

- Registros día 31 de agosto de 2011

Se registró una serie de datos en las siguientes condiciones:

Fecha: 31-08-2011
Hora: 15:10
T° ambiente
[°C]: 26,4

La tabla 3.7 entrega la serie del registro efectuado.

Tabla 3.7 Registro de datos N°4 de la temperatura del suelo

Cable			
Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
-0,5	9,2	-0,5	9,0
-1,0	10,1	-1,0	9,9
-1,5	10,7	-1,5	10,8
-2,0	11,1	-2,5	12,4
-3,0	12,8	-3,5	13,2
-4,0	13,6	-4,5	13,8
-5,0	14,2	-5,5	13,9
-6,0	14,3	-6,0	14,2

Temperatura promedio general [°C]= 12,1
Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 13,8

Las figuras 3.15 y 3.16 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

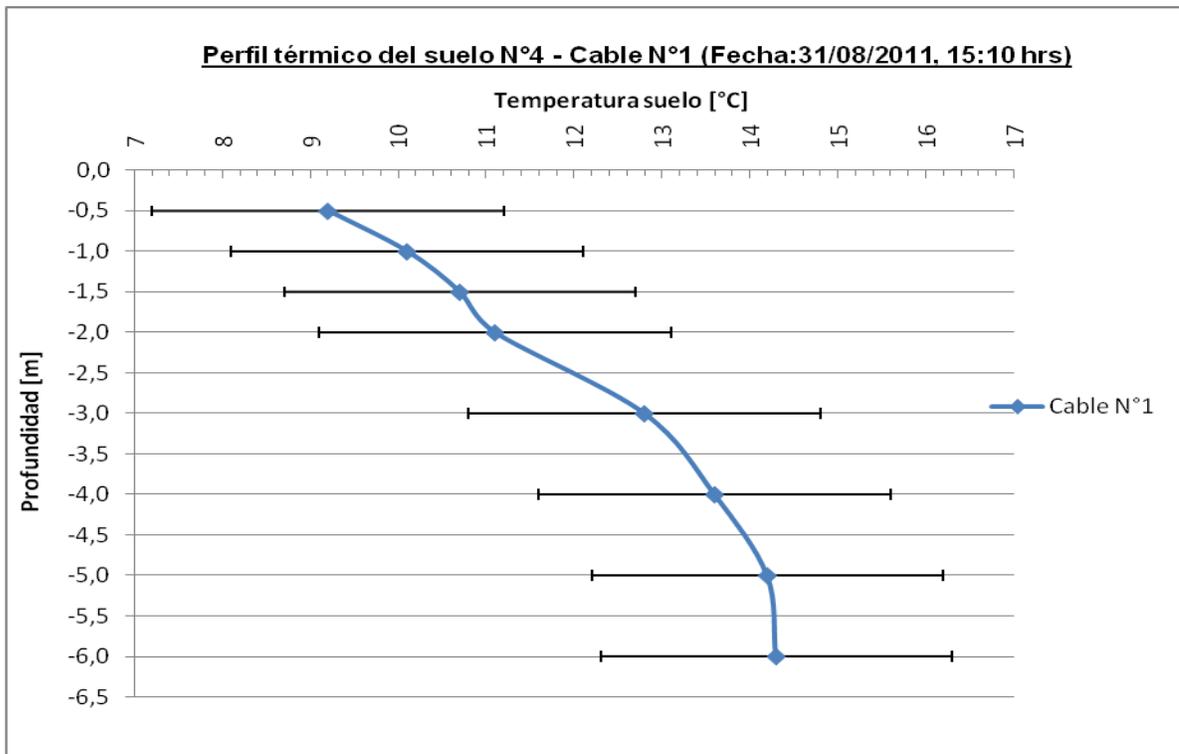


Figura 3.15 Perfil térmico cable N°1, registro N°4.

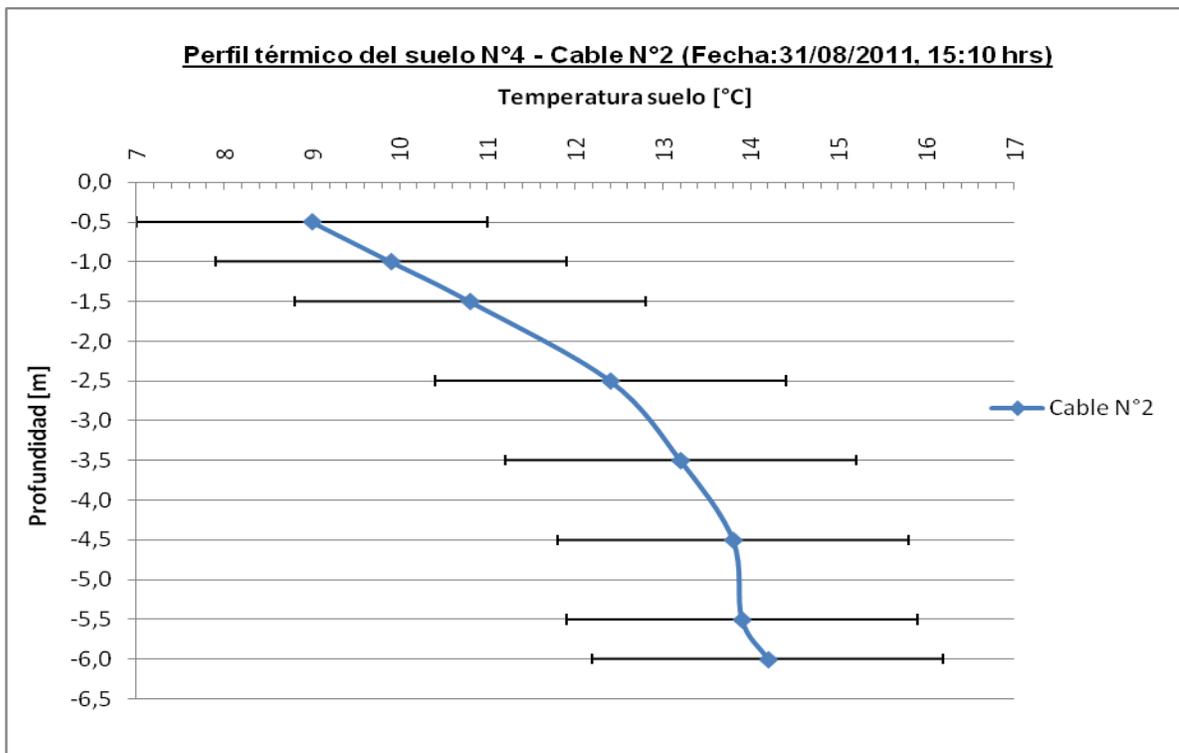


Figura 3.16 Perfil térmico cable N°2, registro N°4.

– Registros día 01 de septiembre de 2011

Se registraron tres series de datos en este día en las siguientes condiciones:

Fecha: 01-09-2011
Hora: 10:30
T° ambiente [°C]: 18,9

La tabla 3.8 entrega la serie del registro efectuado.

Tabla 3.8 Registro de datos N°5 de la temperatura del suelo

Cable			
Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
-0,5	9,1	-0,5	8,8
-1,0	10,2	-1,0	9,8
-1,5	10,7	-1,5	10,7
-2,0	11,2	-2,5	12,4
-3,0	12,7	-3,5	13,1
-4,0	13,7	-4,5	13,8
-5,0	14,1	-5,5	13,8
-6,0	14,4	-6,0	14,0

Temperatura promedio general [°C]= 12,0
Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 13,7

Las figuras 3.17 y 3.18 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

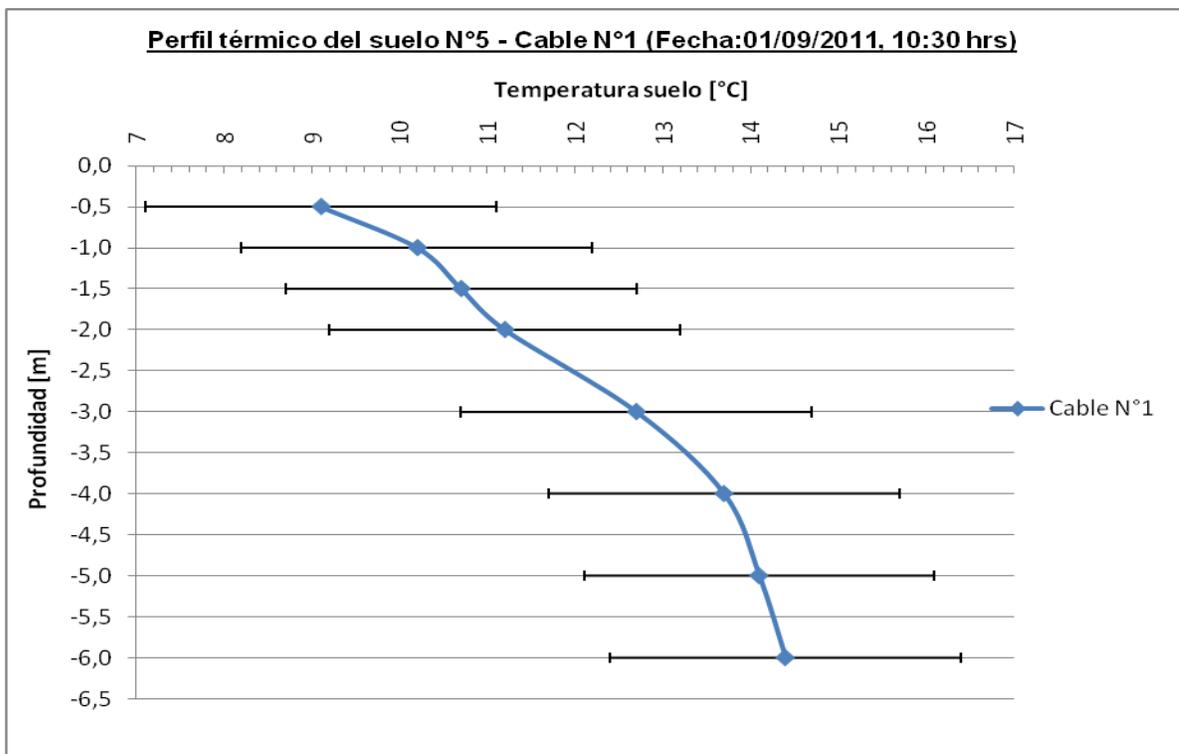


Figura 3.17 Perfil térmico cable N°1, registro N°5.

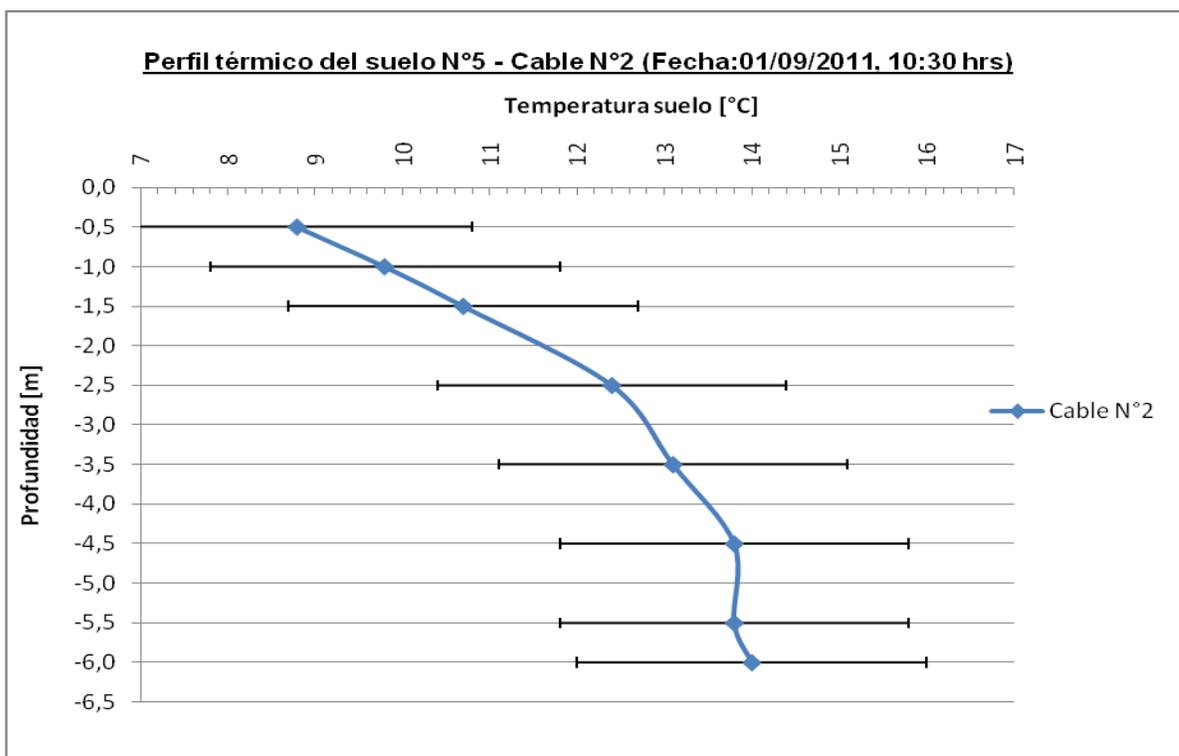


Figura 3.18 Perfil térmico cable N°2, registro N°5.

Fecha: 01-09-2011
 Hora: 13:00
 T° ambiente [°C]: 22,4

La tabla 3.9 entrega la serie del registro efectuado.

Tabla 3.9 Registro de datos N°6 de la temperatura del suelo

Cable			
Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
-0,5	9,2	-0,5	8,8
-1,0	10,1	-1,0	9,9
-1,5	10,8	-1,5	10,8
-2,0	11,5	-2,5	12,3
-3,0	12,9	-3,5	13,2
-4,0	13,8	-4,5	13,9
-5,0	14,3	-5,5	13,8
-6,0	14,2	-6,0	14,2

Temperatura promedio general [°C]= 12,1
 Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 13,8

Las figuras 3.19 y 3.20 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

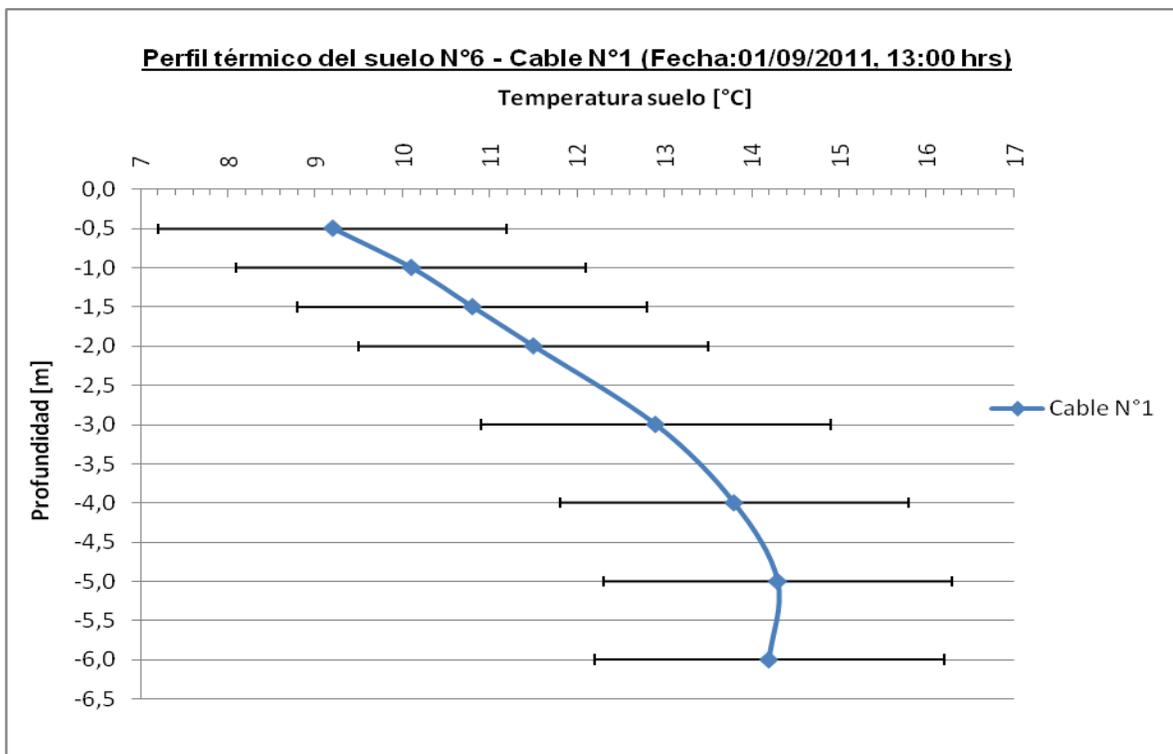


Figura 3.19 Perfil térmico cable N°1, registro N°6.

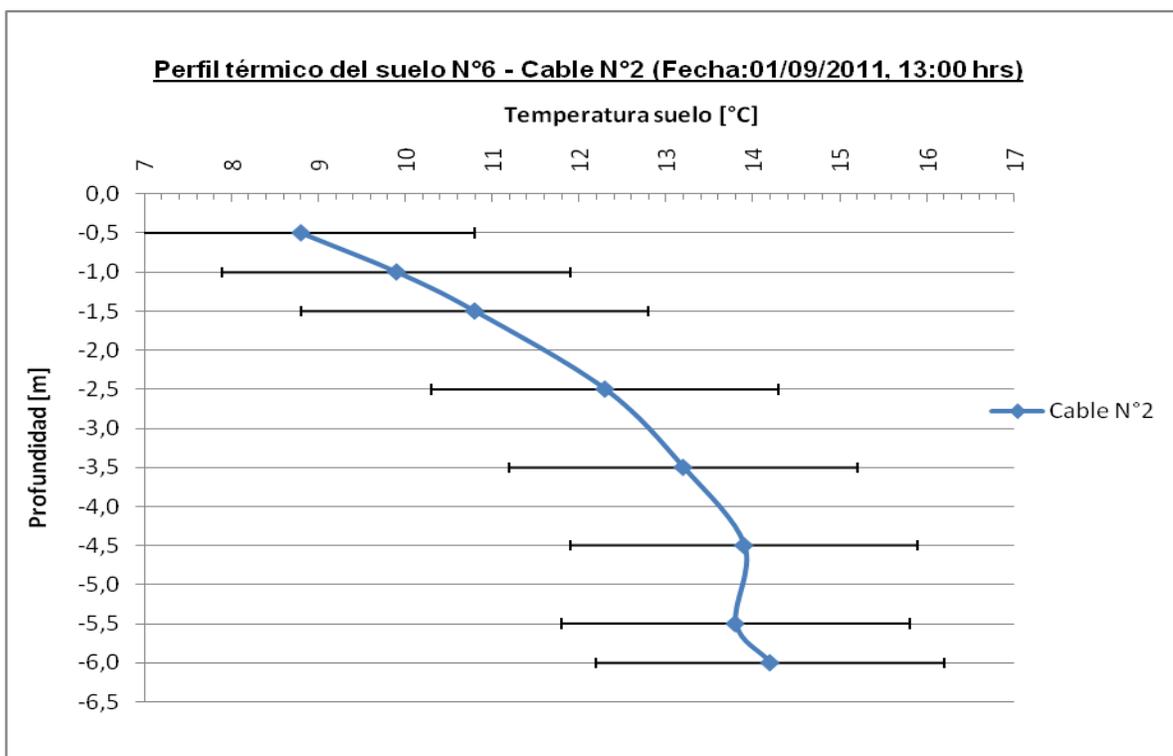


Figura 3.20 Perfil térmico cable N°2, registro N°6.

Fecha: 01-09-2011
 Hora: 18:00
 T° ambiente [°C]: 14,1

La tabla 3.10 entrega la serie del registro efectuado.

Tabla 3.10 Registro de datos N°7 de la temperatura del suelo

Cable			
Cable N°1 (lado sur)		Cable N°2 (lado norte)	
Profundidad [m]	Temperatura [°C]	Profundidad [m]	Temperatura [°C]
-0,5	9,2	-0,5	8,8
-1,0	10,2	-1,0	9,9
-1,5	10,8	-1,5	10,7
-2,0	11,4	-2,5	12,4
-3,0	12,9	-3,5	13,3
-4,0	13,9	-4,5	13,9
-5,0	14,4	-5,5	14,0
-6,0	14,3	-6,0	14,3

Temperatura promedio general [°C]= 12,2
 Temperatura promedio después de los -3 m [°C]= 13,9

Las figuras 3.21 y 3.22 grafican el perfil térmico del suelo para cada cable.

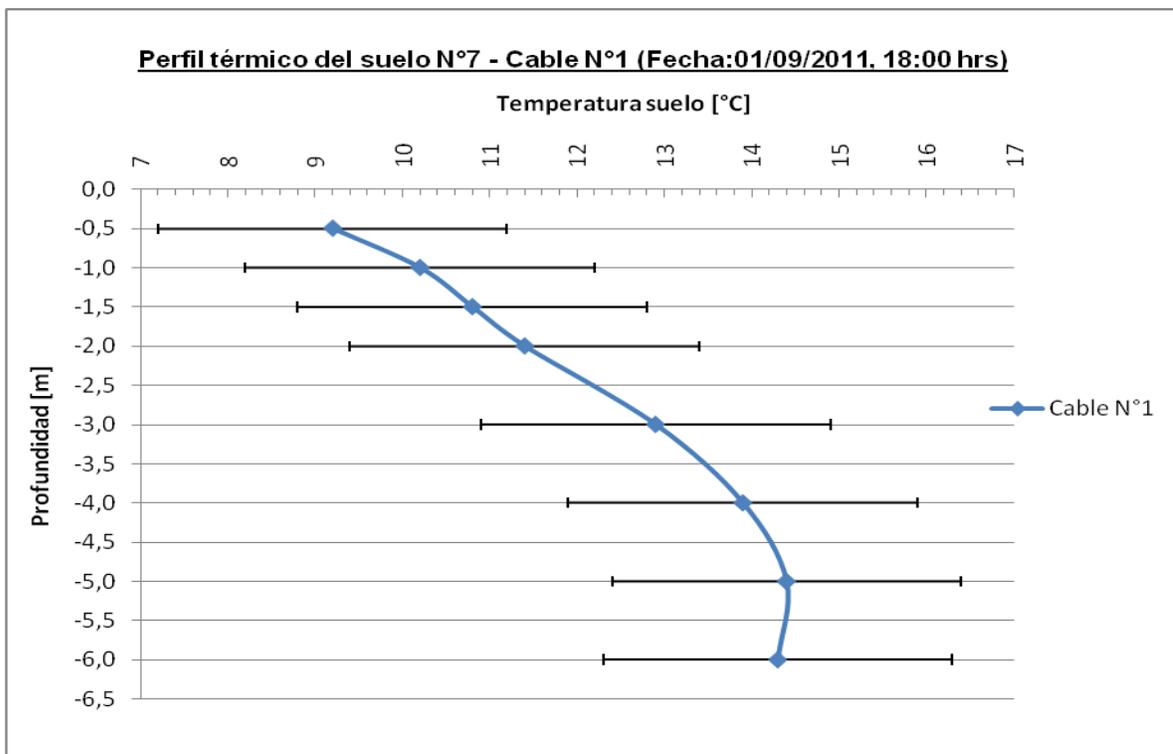


Figura 3.21 Perfil térmico cable N°1, registro N°7.

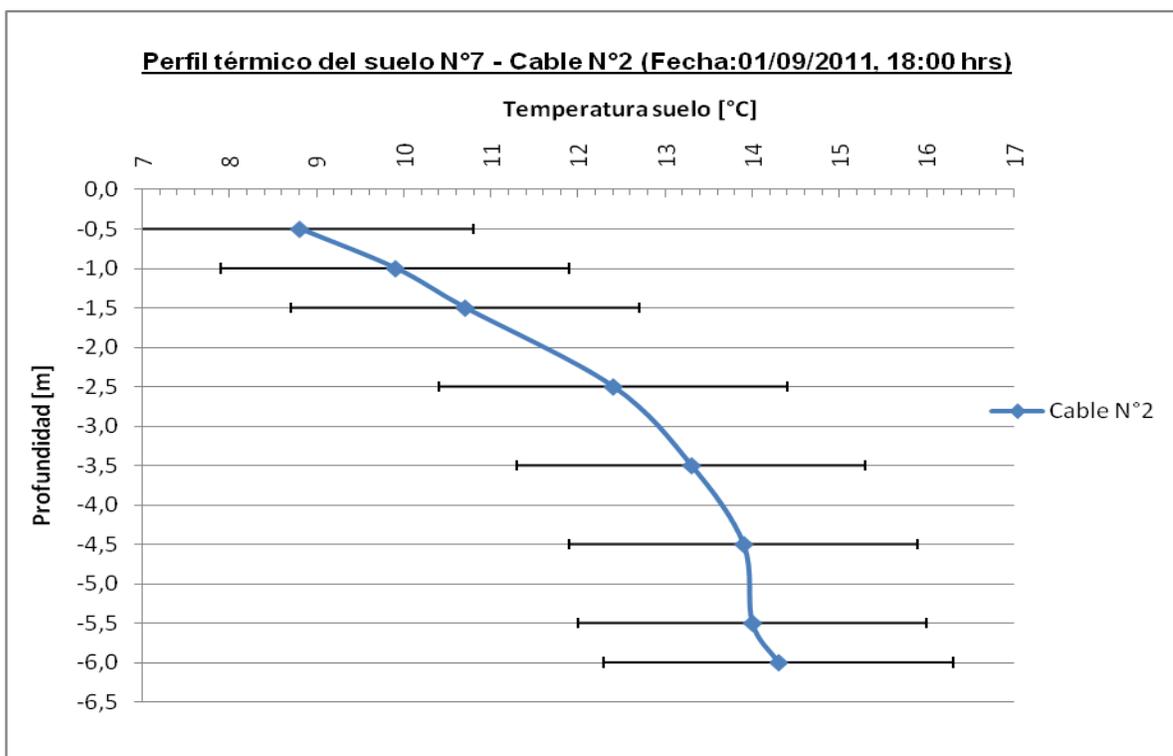


Figura 3.22 Perfil térmico cable N°1, registro N°7.

En forma de resumen se entrega la tabla 3.11, donde se indica para cada registro la temperatura ambiente, la hora de la toma del registro, el promedio total del perfil térmico encontrado y el promedio entre los 3 y 6 metros de profundidad. Se calculó un promedio de la temperatura del suelo entre los 3 y 6 metros de profundidad debido a que en este rango las temperaturas comienzan a converger a un valor constante que a mayor profundidad corresponde a la temperatura constante del suelo a cierta profundidad.

Tabla 3.11 Resumen de los registros de temperatura del suelo.

Datos	Periodos						
	09-06-2011 y 23-06-2011			31-08-2011 y 01-09-2011			
	09-06-2011	23-06-2011		31-08-2011	01-09-2011		
	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7
T° ambiente [°C]	16,3	9,2	17,0	26,4	18,9	22,4	14,1
Hora [hh:mm]	17:05	9:45	12:45	15:10	10:30	13:00	18:00
T° promedio total [°C]	14,2	13,5	13,5	12,1	12,0	12,1	12,2
T° promedio bajo los 3m [°C]	15,6	15,4	15,4	13,8	13,7	13,8	13,9

En la tabla 3.11 se puede apreciar que existe una diferencia entre las temperaturas promedio encontradas para el primer periodo (15.6, 15.4 y 15.4 °C) con respecto al segundo (13.8, 13.7, 13.8 y 13.9 °C). Esta diferencia se debe a que el primer periodo corresponde a datos obtenido durante el mes de junio, es decir, a comienzos de la estación de invierno. En cambio el segundo periodo corresponde a datos obtenidos durante el último día del mes de agosto y el primero de septiembre, es decir, a fines del periodo de invierno. Es por este motivo que los promedios obtenidos en el segundo periodo son más bajos que los del primero, debido a un descenso, en profundidad, de la masa térmica del suelo que provoca una pérdida de calor en la zona cercana a la superficie.

EL gráfico presentado en la figura 3.23 compara los perfiles térmico del suelo obtenidos en los registros N°3 del día 23-06-2011 y N°6 del día 01-09-2011. Se puede observar que el perfil térmico del registro N°3 va por sobre el perfil térmico del registro N°6. Esto demuestra que las temperaturas del suelo en los primeras 6 metros han disminuido después de transcurrido el periodo entre junio y septiembre, es decir, pasado el invierno.

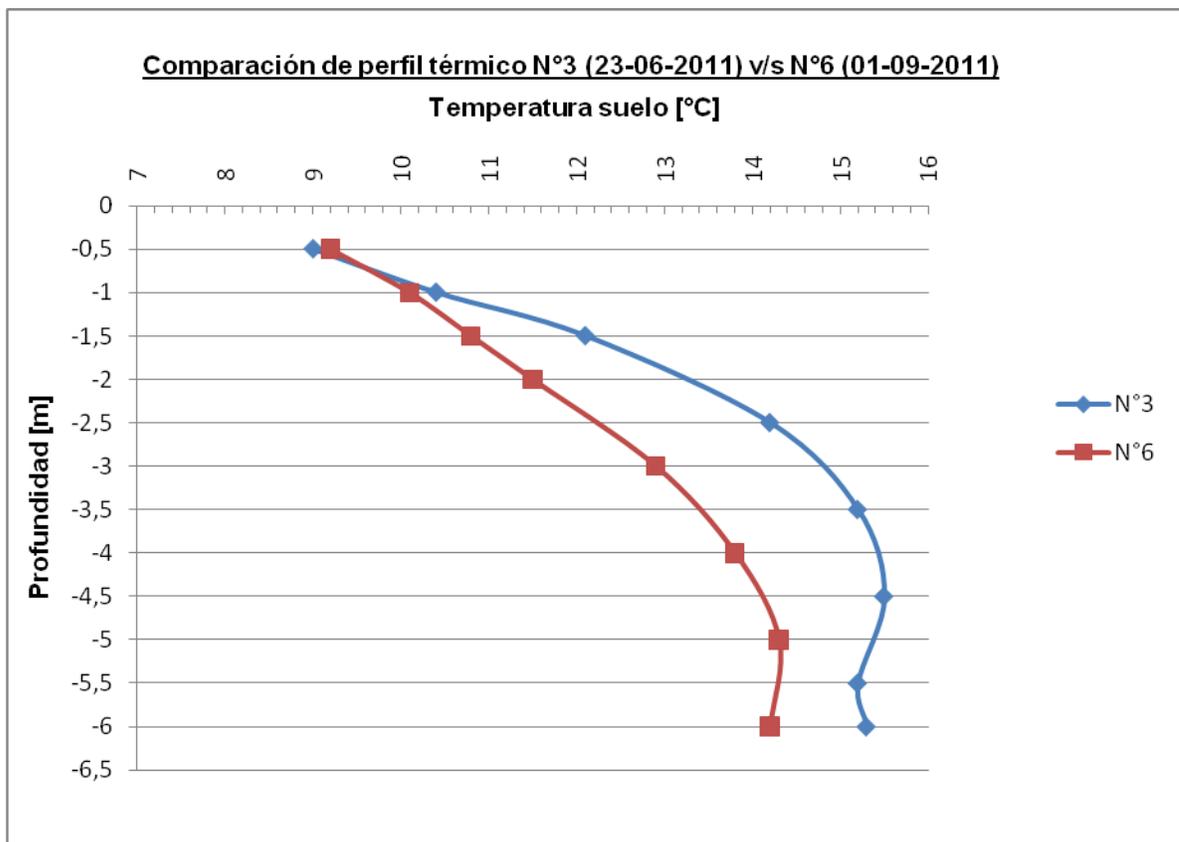


Figura 3.23 Perfil térmico N°3 V/S N°6

En conclusión, los perfiles térmicos obtenidos, tanto en el primer periodo como en el segundo, indican que si bien las temperaturas a una profundidad de 3 metros ya comienzan a converger a un valor constante, aún se encuentran en un tramo creciente de la curva indicada en la figura 3.1. Es por este motivo, que la temperatura promedio esperada para el suelo a mayores profundidades debería ser mayor a 15°C.

Se propone un estudio que sirva de complemento a lo indicado, en donde se comparen perfiles térmicos del suelo obtenidos en distintas épocas del año, abarcando las 4 estaciones, con el objetivo de visualizar el ascenso y descenso de la masa de calor del suelo.

3.3 Test de respuesta térmica

La importancia de obtener un valor exacto de la conductividad térmica efectiva se debe a que en base a esta variable se dimensionará la cantidad de perforaciones necesarias para el sistema geotérmico a instalar. En base al valor encontrado, se podrá estar en dos casos, que el valor de conductividad térmica encontrado sea mayor que el valor real (λ_{real}) o que sea menor:

Si la conductividad térmica efectiva (λ_{ef}) encontrada es mayor que el valor real (λ_{real}) de esta, entonces la cantidad de perforaciones dimensionadas será menor que las necesarias, por ende el sistema geotérmico no tendrá u menor ahorro energético.

Si la conductividad térmica efectiva (λ_{ef}) encontrada es menor que el valor real (λ_{real}) de esta, entonces la cantidad de perforaciones dimensionada será mayor que las necesarias. Si bien esto permitirá obtener el ahorro energético de diseño, se realizará un mayor gasto en perforación, y hay que recordar que los costos asociados a la perforación corresponden a una parte importante de la inversión total.

Esta conductividad térmica efectiva se puede medir de dos formas. El primer método corresponde a realizar una perforación o calicata de una profundidad igual a la del sistema geotérmico con el fin de ir tomando muestras de todos los tipos de suelo que se tendrán en profundidad e ir midiendo su conductividad mediante ensayos en laboratorios. Este método es bastante laborioso y de gran costo y complejidad. Además no toma en cuenta todos los materiales (tubería, material de relleno, etc.) y la existencia del nivel freático, por ende la influencia de las aguas subterráneas sobre nuestro sistema geotérmico no se verá reflejada en el valor de conductividad encontrado. Este método es ocupado para aprovechamientos geotérmicos que requiera una baja instalación.

Un segundo método, y ocupado para dimensionar instalaciones geotérmicas de gran magnitud, es el llamado Test de Respuesta Térmica (TRT). Este test corresponde a un método que permite obtener el valor de la conductividad térmica efectiva del sistema geotérmico, considerando el efecto de aguas subterráneas y tomando en cuenta todos los materiales que el flujo de calor deberá atravesar hacia o desde el suelo. Este método es el que se desarrolló en este trabajo de título.

El modelo analítico utilizado en el análisis corresponde al de pozos o sistemas geotérmicos verticales (Ingersoll & Plass, 1948). En nuestro caso, y como uno de los objetivos de la investigación es una adaptación al concepto de Energy Piles, se adoptó el supuesto que tanto los circuitos de cañerías instaladas en los anclajes como los instalados en las PE, tienen un comportamiento comparable y similar al de un pozo vertical, por ende el modelo analítico utilizado corresponde al entregado por la literatura consultada (Sharqawy "et al", 2009), y que supone además una transferencia de calor por conducción en 2D (dos dimensiones).

3.3.1 Funcionamiento del test de respuesta térmica.

Para la realización del test de respuesta térmica son necesarios los siguientes componentes:

- Perforación geotérmica con circuito de cañerías (Loop)
- Calefactor eléctrico
- Bomba de circulación
- Regulador de caudal
- Sistema de toma de datos

Lo ideal es realizar una perforación geotérmica con una longitud igual o comparable a la que se ha estimado necesaria para el sistema geotérmico. Para el caso de esta investigación, la longitud de perforación es una constante, en donde se aprovechó la perforación ya realizada tanto para las PE como para los anclajes, por lo tanto será una constante la longitud de perforación (L) será una constante.

En la perforación realizada se introduce el circuito de cañerías que estará a cargo de circular el fluido a lo largo de la perforación y realizar el intercambio de calor con el suelo. Este circuito de cañerías (Loop) se une a la unidad móvil de TRT.

La unidad móvil de TRT corresponde a un equipo de adquisición de datos que tiene como finalidad realizar la circulación del fluido por el circuito de cañerías mediante la bomba de circulación e ir registrando los datos de interés. Mediante un calefactor eléctrico se calienta el fluido que se hará circular a lo largo de toda la perforación geotérmica a través del circuito de cañerías instalado. La figura 3.24.a representa un esquema del diseño y del funcionamiento del equipo móvil de TRT. En donde, para la realización de un ensayo, a través de la bomba de circulación y el regulador de caudal se entrega un flujo continuo al calefactor eléctrico, el que

le transfiere al fluido una potencia en forma de calor. Esta temperatura corresponde a la de entrada del fluido al circuito y es registrada mediante una termocupla ($T^{\circ}in$). Una vez que el fluido recorre todo el circuito geotérmico, este retorna al equipo móvil de TRT registrando su temperatura de llegada mediante otra termocupla ($T^{\circ}out$) para luego empezar nuevamente el recorrido. Las flechas indican el recorrido que realiza el fluido en el equipo móvil de TRT.

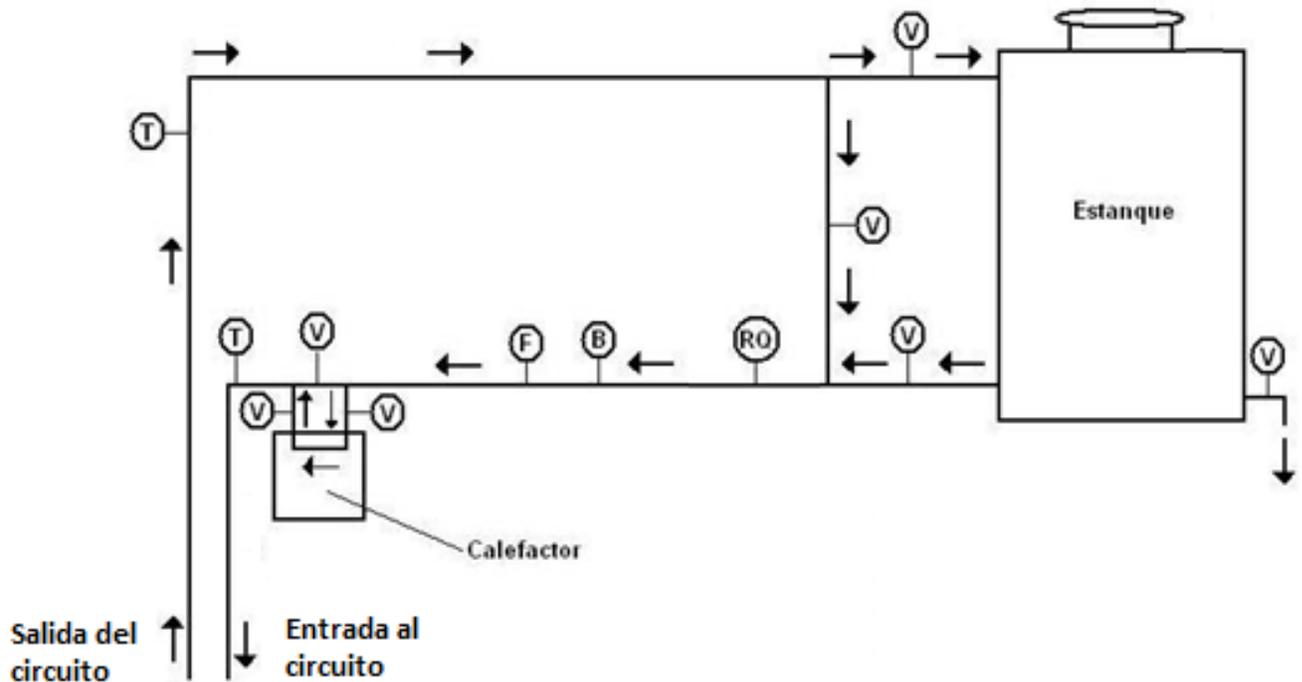


Figura 3.24.a Esquema del funcionamiento del equipo móvil de TRT.

Dónde:

T: Termocupla (2, una de entrada al circuito y otra de salida del circuito)

RQ: Regulador de caudal

B: Bomba de circulación

F: Filtro

V: Válvulas

La figura 3.24.b muestra el equipo móvil diseñado y armado para el estudio realizado.

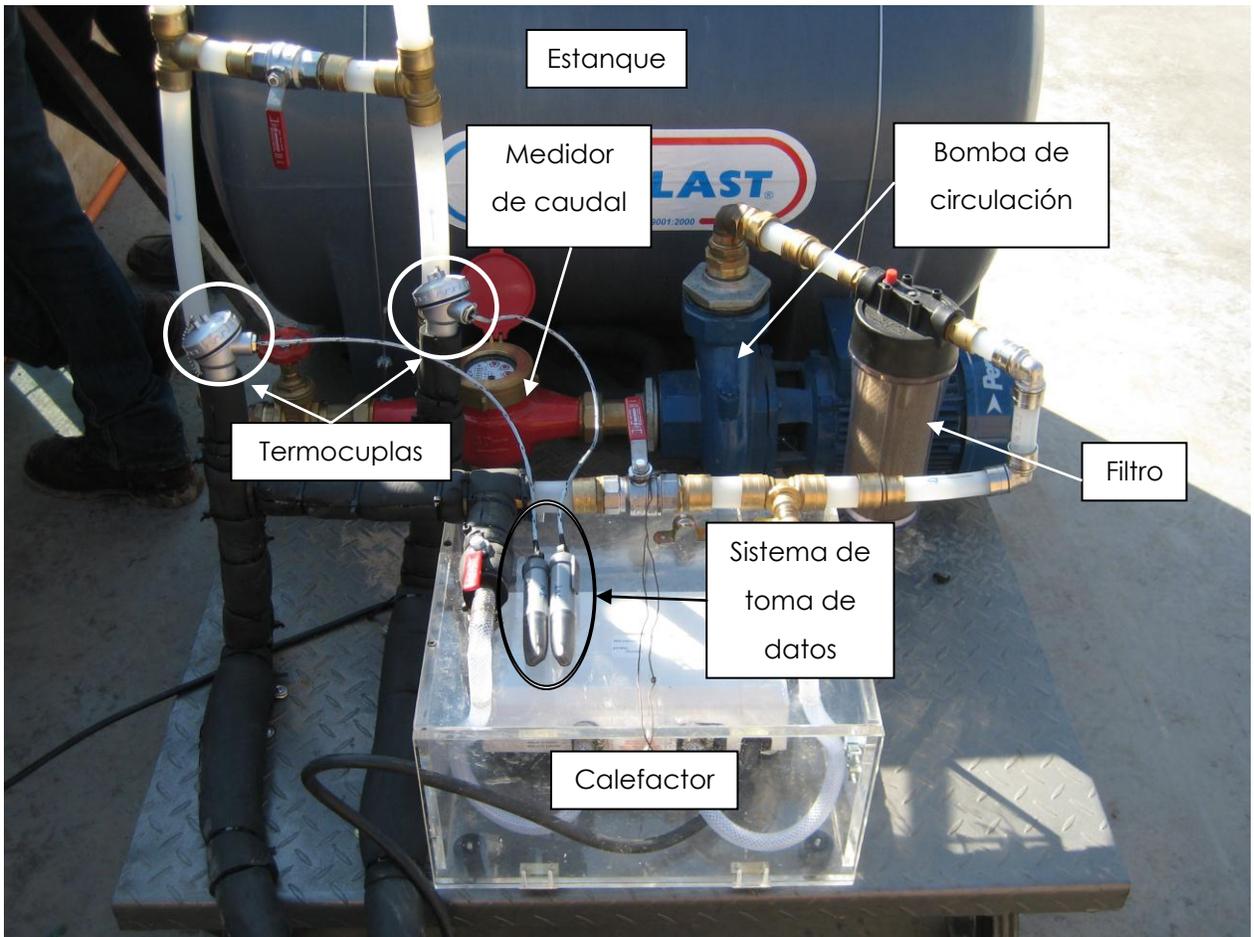


Figura 3.24.b Equipo móvil del TRT fabricado.

La potencia que se buscará disipar a lo largo de la perforación debe ser aproximadamente igual a la que teóricamente se buscará disipar con el sistema geotérmico completo. Habitualmente se considera una potencia de 50 W/m y se asignará mediante la letra "q". Por lo tanto, con el dato de la longitud de perforación y la potencia a disipar, se calcula la potencia total que debe ser entregada al fluido mediante el calefactor eléctrico (Q). Para nuestro caso, el calefactor eléctrico tiene un rango de operación de la potencia que va entre los 5000 y 9000W aproximadamente.

Las variables que se irán midiendo con el equipo de adquisición de datos ubicado en la unidad móvil de TRT, son la temperatura de entrada "T°in" y de salida "T°out", además la potencia entregada al calefactor eléctrico "Q", el tiempo "t" de duración del test y el caudal "C".

EL test termina cuando las temperaturas de entrada y salida convergen a un valor constante cada una. Luego se tendrá una evolución de las temperaturas en función del tiempo. Se grafica en escala logarítmica la diferencia de temperaturas entre el fluido ($T^{\circ}f$) y el suelo ($T^{\circ}g$) en función del tiempo. La temperatura del fluido es calculada como el promedio de las $T^{\circ}in$ y $T^{\circ}out$. De la pendiente de la recta obtenida del gráfico se obtiene la conductividad térmica efectiva del suelo y los materiales que actúan en el intercambio de calor en la perforación geotérmica mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_{ef} = \frac{Q^{\circ}}{4 * \pi * L * k}$$

Dónde:

k: Corresponde a la pendiente de la recta señalada [$^{\circ}C$].

L: Longitud de la perforación geotérmica [m].

Q° : Potencia entregada por el calefactor [W]

El valor de conductividad térmica efectiva encontrado ya tendrá en cuenta todos los estratos de suelo que estén presentes a lo largo de la perforación geotérmica, además de la influencia del agua subterránea.

Además, de los datos de obtenidos del TRT, $T^{\circ}in$ y $T^{\circ}out$, se calcula la resistencia térmica efectiva del suelo R_{ef} , utilizando la siguiente fórmula:

$$R_{ef} = \frac{T^{\circ}f(t) - T^{\circ}g}{\frac{Q^{\circ}}{L}}$$

Dónde:

$T^{\circ}f(t)$: Temperatura media del fluido en el tiempo, calculada como el promedio entre la temperatura de entrada $T^{\circ}in$ y la temperatura de salida $T^{\circ}out$ [$^{\circ}C$].

$T^{\circ}g$: Temperatura promedio del suelo sin perturbar [$^{\circ}C$]

3.3.2 Resultados del test de respuesta térmica (TRT)

De los cuatro circuitos instalados PE101, PE100, Anclajes PE101 y Anclajes PE100, solo fue posible realizar el TRT en los circuitos instalados en los anclajes, es decir en los anclajes de la PE101 y en los anclajes de la PE100. Un posible deterioro o acumulación de material particulado en el interior de las cañerías producto del tiempo transcurrido y de la exposición de las cañerías durante el periodo de construcción provocó una obstrucción en algún punto del circuito, en donde se logró medir el paso de caudal en disminución hasta llegar a cero.

Para los circuitos en funcionamiento, se realizaron 4 test de respuesta térmica. Los dos primeros TRT se realizaron en el circuito colocado en los anclajes de la PE101. Después se realizó un tercer TRT en el circuito colocado en los anclajes de la PE100. Finalmente se realizó el cuarto TRT en el circuito conjunto formado por la unión de los dos circuitos colocados en los anclajes de las PE101 y PE100.

Para efectos del TRT, la temperatura promedio del suelo ($T^{\circ}g$) considerada fue de $16^{\circ}C$, un grado más que los $15^{\circ}C$ obtenidos en el perfil térmico del suelo. Esta consideración obedece a que los datos obtenidos en el perfil térmico del suelo se consideran que pertenecen aun a la zona creciente de la curva de, por ende la temperatura del suelo debería ser mayor.

Los resultados para cada TRT realizado se expresan a continuación.

- Ensayo 1

TRT en: Anclajes PE101
 Desde: 30-08-2011 10:40
 Hasta: 31-08-2011 12:42
 Duración [hrs]: 26:01:00

La figura 3.25 grafica las temperaturas de entrada, salida y del fluido que se registraron durante todo el periodo de duración del ensayo 1. Se puede observar que a partir de las 2 horas, las curvas ya empiezan a converger a un valor constante, sin embargo la variación disminuye y la convergencia se hace más notoria a partir de las 7 horas de iniciado el ensayo. Por otro lado, pasada las 13 horas de ensayo, las temperaturas comienzan a disminuir. Este suceso se debe a una disminución del caudal que provocó el apagado del calefactor eléctrico. Por el mismo motivo, y debido a que la bomba de circulación sigue funcionando, se produjo entre el tramo de la bomba y la Termocupla de salida ($T^{\circ}out$) un efecto de cavitación que hizo aumentar la temperatura a $100^{\circ}C$, este efecto se indica en el gráfico de la figura 3.25 mediante un círculo. Finalmente, después de las 22 horas, se intentó retomar el ensayo sin éxito.

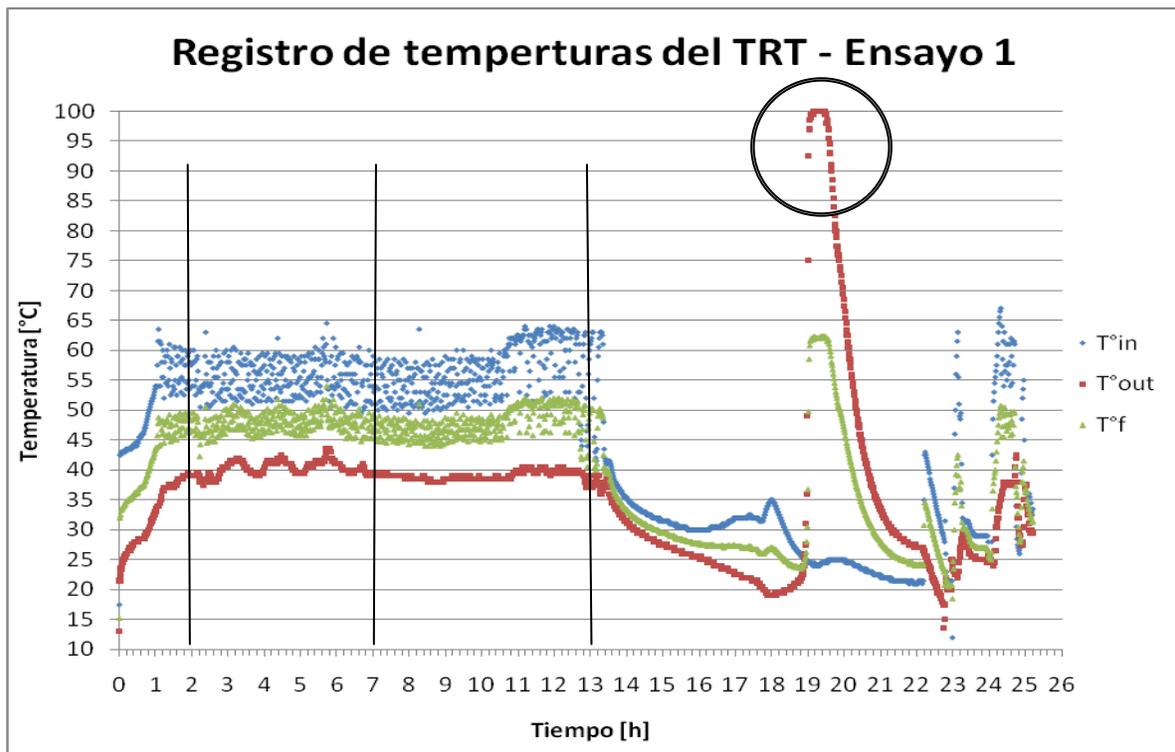


Figura 3.25 $T^{\circ}in$, $T^{\circ}out$ y $T^{\circ}f$ registradas en ensayo 1

Los datos después de las 13 horas no son tomados en el análisis debido a que se trata en una discontinuidad del ensayo. El gráfico presentado en la figura 3.26 muestra el ensayo descartando esos datos. Además se identifican las temperaturas finales de cada curva:

$$T^{\circ}_{in} (t = 13 \text{ horas}) = 58^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}_{out} (t = 13 \text{ horas}) = 40^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}_{f} (t = 13 \text{ horas}) = 49^{\circ}\text{C}$$

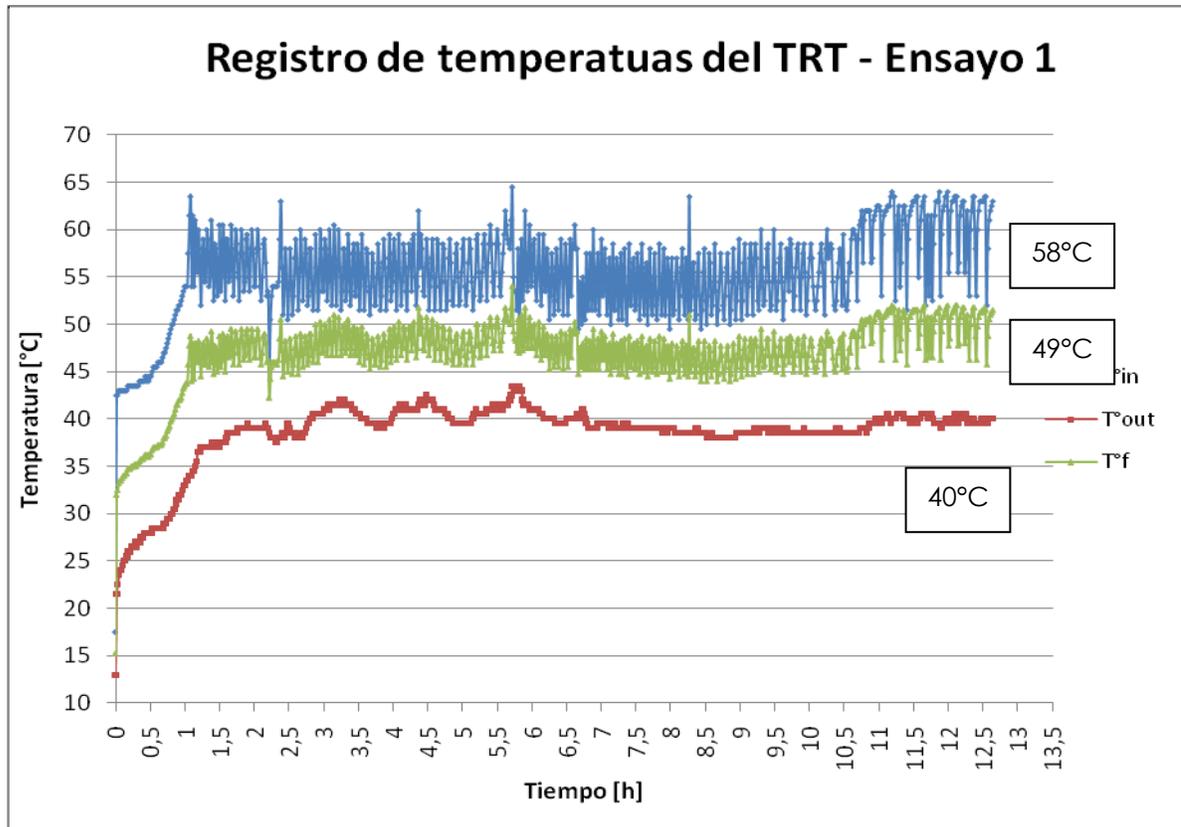


Figura 3.26 T°_{in} , T°_{out} y T°_{f} en tramo de interés registradas en ensayo 1

En base a estos datos se obtuvo la conductividad térmica efectiva λ_{ef} . En la figura 3.27 se graficó en el eje de abscisas el logaritmo natural del tiempo y en el eje de ordenadas la diferencia entre la temperatura media del fluido T°_{f} y la del suelo T°_{g} . Esta última fue considerada 16°C . Un grado más que la temperatura encontrada en el perfil térmico del suelo.

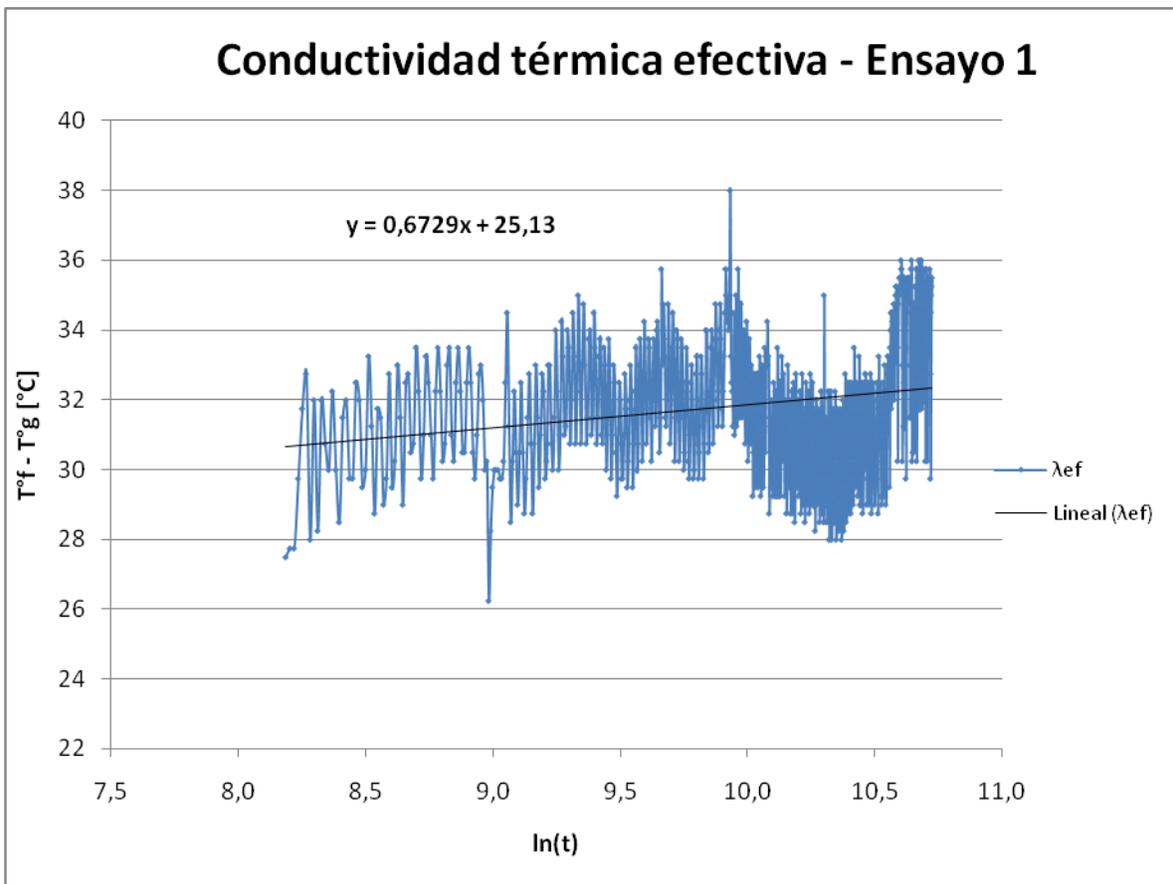


Figura 3.27 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 1

De la ecuación de la línea de tendencia se obtiene el valor de la pendiente $k = 0,6729$ °C.

Considerando los siguientes valores para el cálculo de la conductividad térmica se obtuvo lo siguiente:

Q [W] = 6655
 L [m] = 41,3
 k [°C] = 0,673

 λ_{ef} [W/m°C] = 19,1

De los datos de temperatura registrados también se obtuvo el valor de la resistencia térmica efectiva en el tiempo. El gráfico mostrado en la figura 3.28 detalla la evolución de la resistencia en el tiempo durante el ensayo, convergiendo a un valor de 0,220 m°C/W.

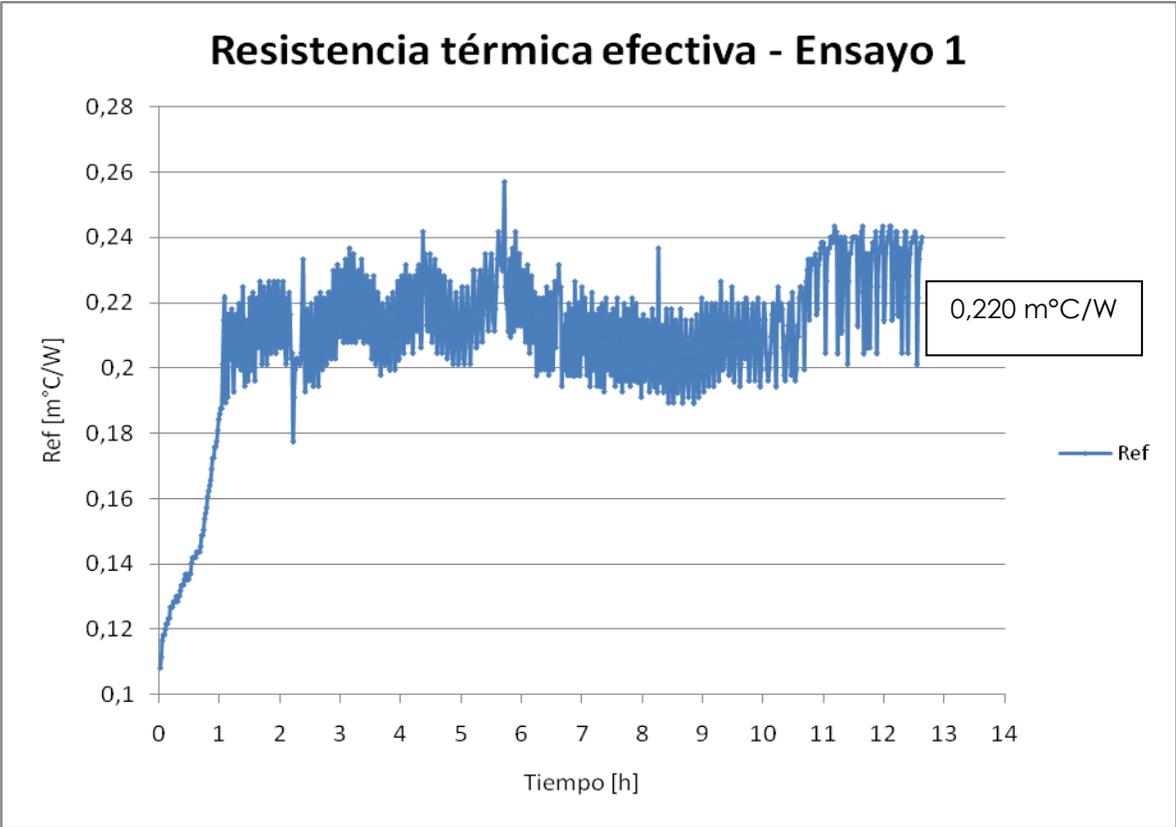


Figura 3.28 Resistencia térmica efectiva - ensayo 1

- Ensayo 2

TRT en: Anclajes PE101
Desde: 06-09-2011 14:39
Hasta: 07-09-2011 9:16
Duración [hrs]: 18:37:00

El segundo ensayo se realizó en el mismo circuito de cañerías instalado en los anclajes de la PE101. Con la diferencia que ahora se redujo la potencia entregada al calefactor eléctrico, de 6.655 W a aproximadamente 5.000 W.

La figura 3.29 grafica las temperaturas de entrada, salida y del fluido que se registraron durante todo el periodo de duración del ensayo 2. Se puede observar que a partir de las 2 horas, las curvas ya empiezan a converger a un valor constante al igual que en el ensayo 1, sin embargo la variación disminuye y la convergencia se hace más notoria a partir de las 4,5 horas de iniciado el ensayo. Por otro lado, pasada las 5,5 horas de ensayo, las temperaturas comienzan a disminuir. Este suceso se debe a una disminución del caudal que provocó el apagado del calefactor eléctrico.

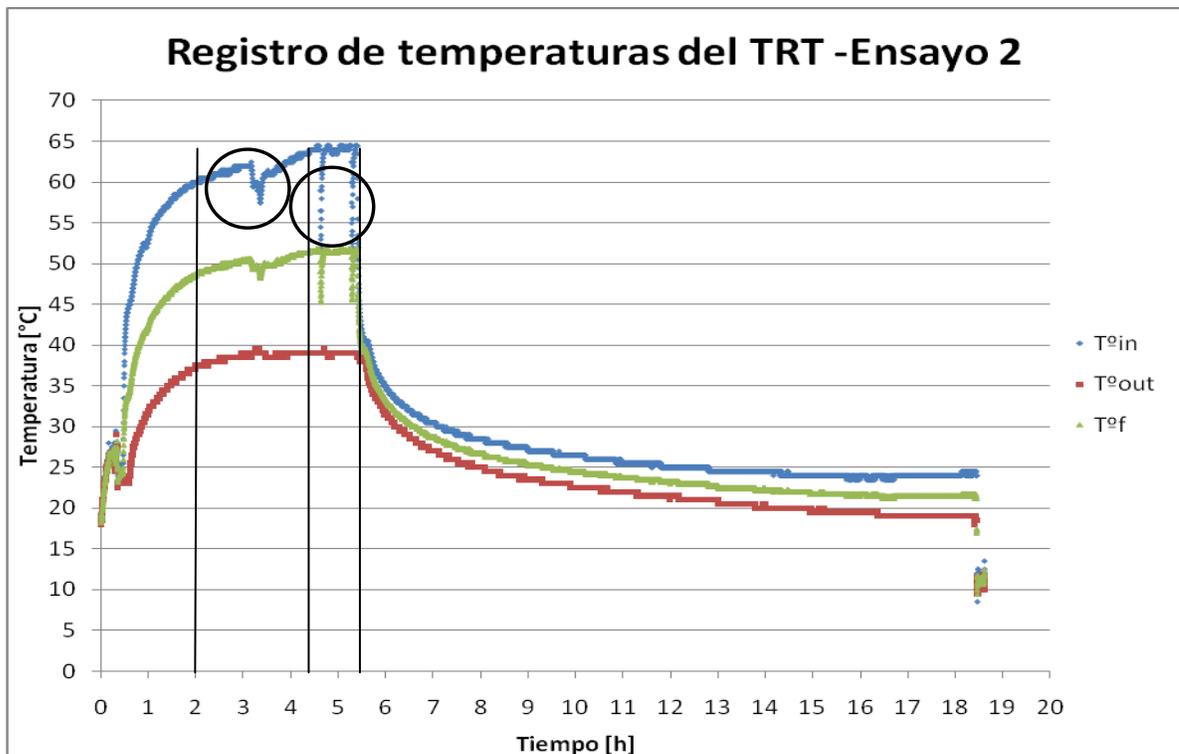


Figura 3.29 T°in, T°out y T°f registradas en ensayo 2

Los datos después de las 5,5 horas no son tomados en el análisis debido a que se trata en una discontinuidad del ensayo. El gráfico presentado en la figura 3.30 muestra el ensayo descartando esos datos. Además se identifican las temperaturas finales de cada curva:

$T^{\circ}in (t = 5,5 \text{ horas}) = 64^{\circ}C$

$T^{\circ}out (t = 5,5 \text{ horas}) = 39^{\circ}C$

$T^{\circ}f (t = 5,5 \text{ horas}) = 51,5^{\circ}C$

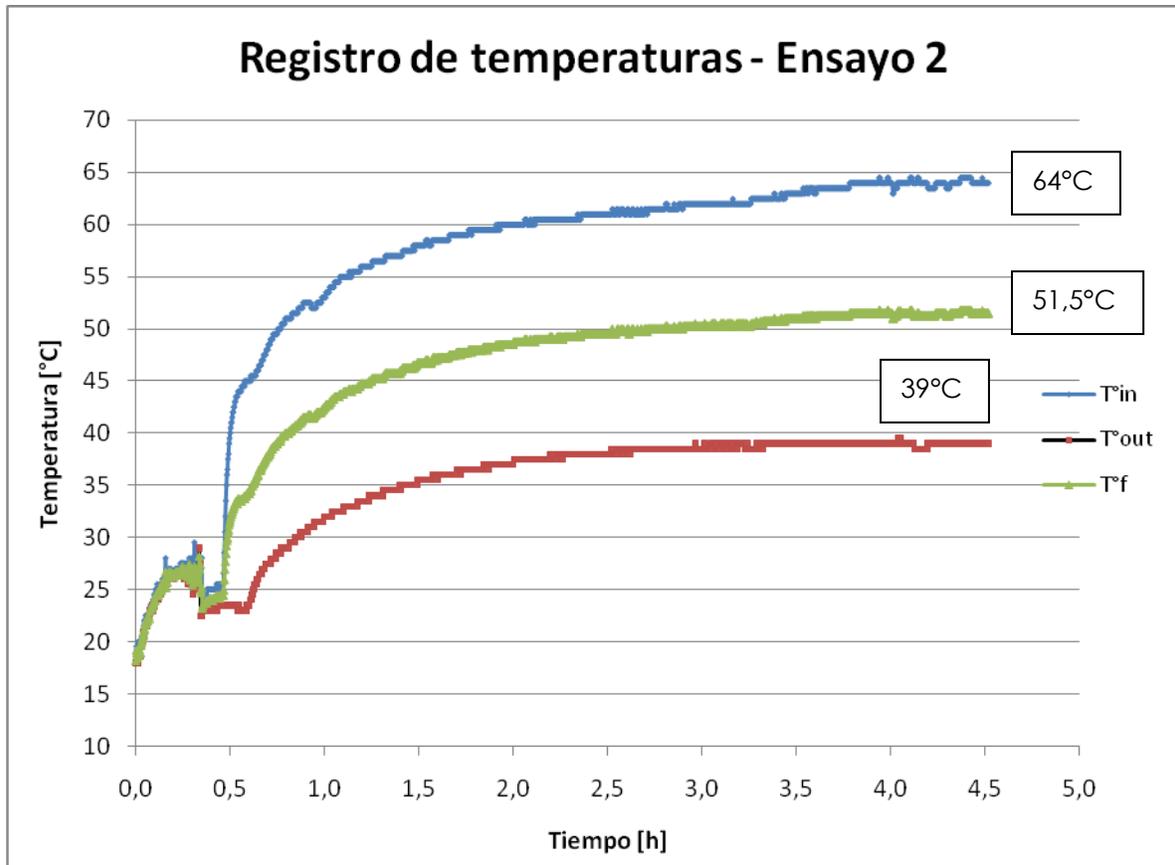


Figura 3.30 $T^{\circ}in$, $T^{\circ}out$ y $T^{\circ}f$ en tramo de interés registradas en ensayo 2

En base a estos datos se obtuvo la conductividad térmica efectiva λ_{ef} . En la figura 3.31 se graficó en el eje de abscisas el logaritmo natural del tiempo y en el eje de ordenadas la diferencia entre la temperatura media del fluido $T^{\circ}f$ y la del suelo $T^{\circ}g$. Esta última fue considerada $16^{\circ}C$. Un grado más que la temperatura encontrada en el perfil térmico del suelo.

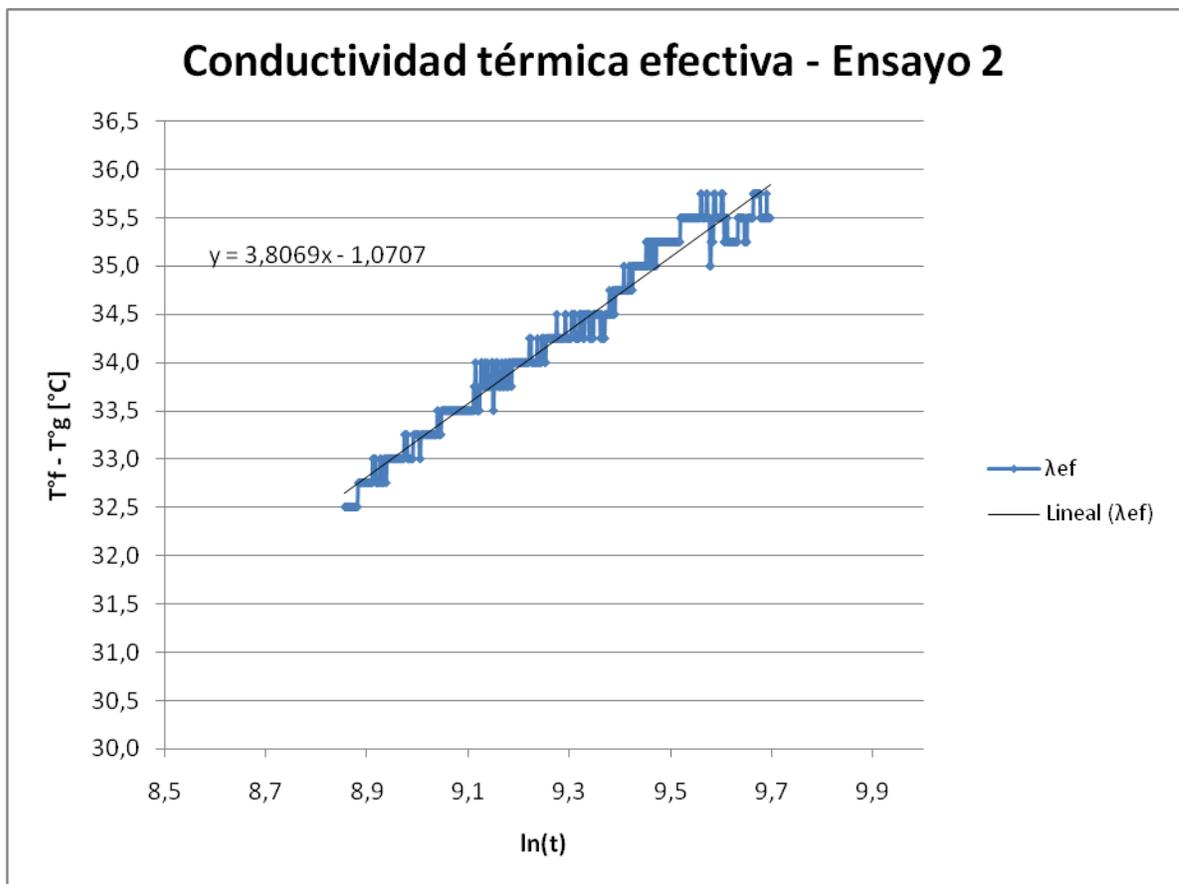


Figura 3.31 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 2

De la ecuación de la línea de tendencia se obtiene el valor de la pendiente $k = 3,807 \text{ } ^{\circ}C$.

Considerando los siguientes valores para el cálculo de la conductividad térmica se obtuvo lo siguiente:

$Q [W] = 5011$
 $L [m] = 41,3$
 $k [^{\circ}C] = 3,807$

$\lambda_{ef} [W/m^{\circ}C] = 2,536$

De la misma forma que para el ensayo 1, de los datos de temperatura registrados también se obtuvo el valor de la resistencia térmica efectiva en el tiempo. El gráfico mostrado en la figura 3.32 detalla la evolución de la resistencia en el tiempo durante el ensayo, convergiendo a un valor de $0,293 \text{ m}^{\circ}C/W$.

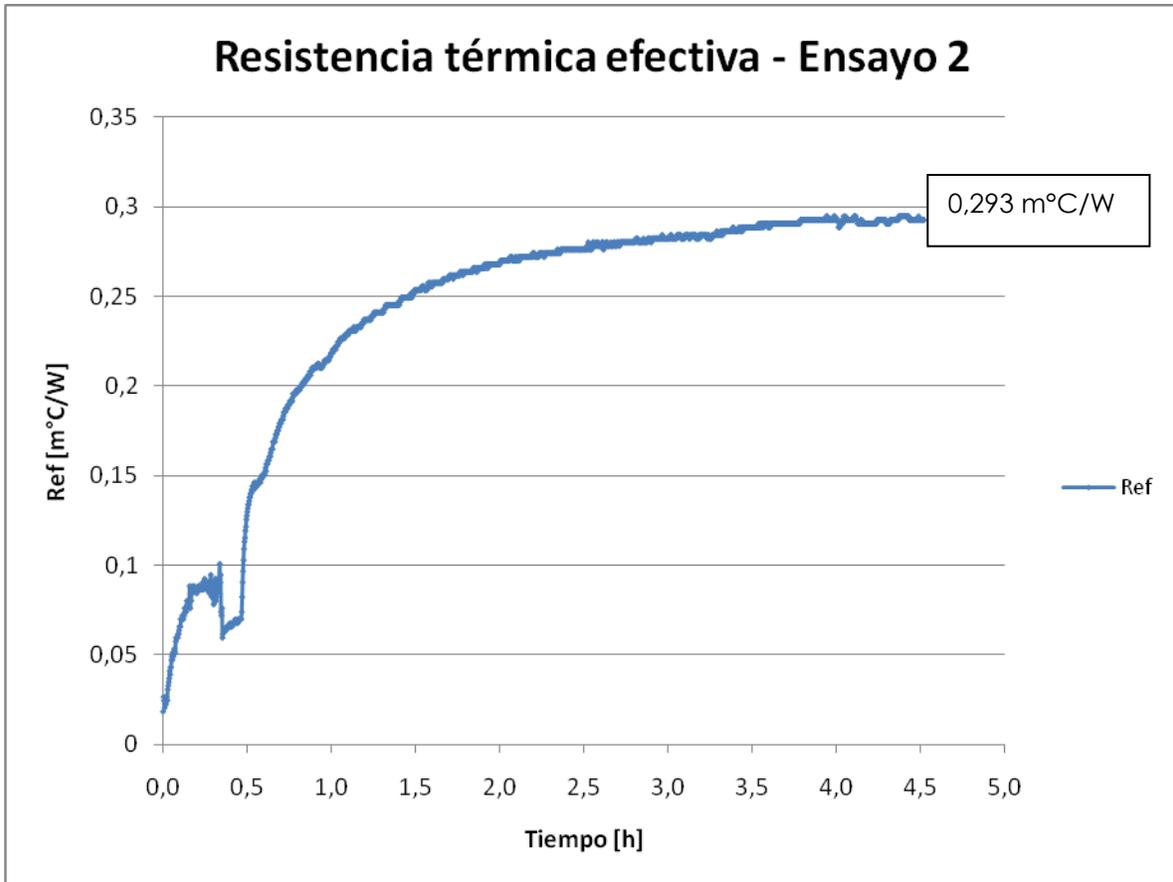


Figura 3.32 Resistencia térmica efectiva - Ensayo 2

- Ensayo 3

TRT en: Anclajes PE100
 Desde: 31-08-2011 12:42
 Hasta: 01-09-2011 8:33
 Duración [hrs]: 18:52:00

El tercer ensayo se realizó en el circuito de cañerías instalado en los anclajes de la PE100.

La figura 3.33 grafica las temperaturas de entrada, salida y del fluido que se registraron durante todo el periodo de duración del ensayo 3. Se puede observar que a partir de las 2 horas, las curvas ya empiezan a converger a un valor constante al igual que en los ensayos 1 y 2, sin embargo la variación disminuye y la convergencia se hace más notoria a partir de las 3,5 horas de iniciado el ensayo. Por otro lado, pasada las 12,5 horas de ensayo, las temperaturas

comienzan a disminuir. Este suceso se debe a una disminución del caudal que provocó el apagado del calefactor eléctrico. Finalmente el ensayo fue detenido después de 19 horas. Mediante elipses se señalan instantes de tiempo en donde la temperatura de entrada ($T^{\circ}in$) disminuye considerablemente. Esta disminución de la temperatura también se debe a un apagado del calefactor por falta de caudal.

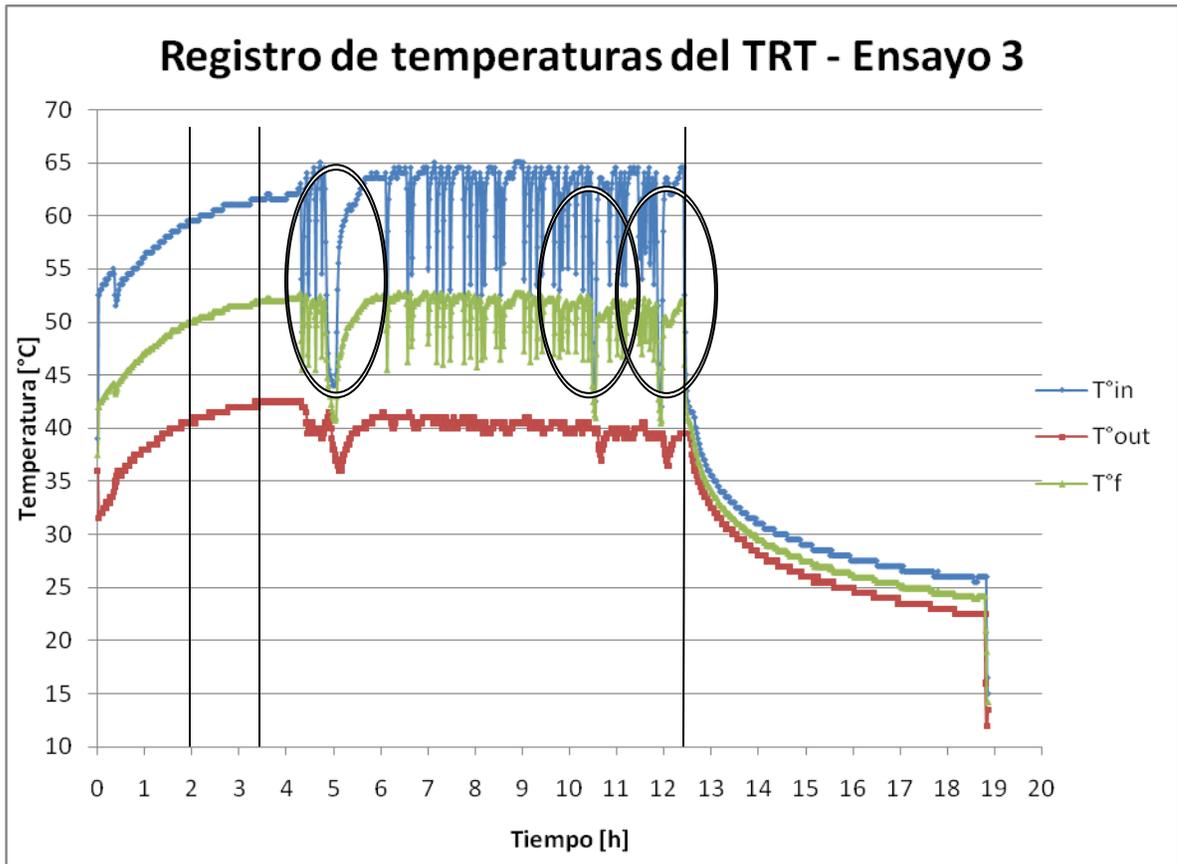


Figura 3.33 $T^{\circ}in$, $T^{\circ}out$ y $T^{\circ}f$ registradas en ensayo 3

Los datos después de las 12,5 horas no son tomados en el análisis debido a que se trata en una discontinuidad del ensayo. Además, también se descartan los tramos de ensayo en donde se produce una disminución de la $T^{\circ}in$ producto del apagado del calefactor. El gráfico presentado en la figura 3.34 muestra el ensayo descartando esos datos. Además se identifican las temperaturas finales de cada curva:

$T^{\circ}in$ (t = 12,5 horas) = 64°C

$T^{\circ}out$ (t = 12,5 horas) = 40°C

$T^{\circ}f$ (t = 12,5 horas) = 52°C

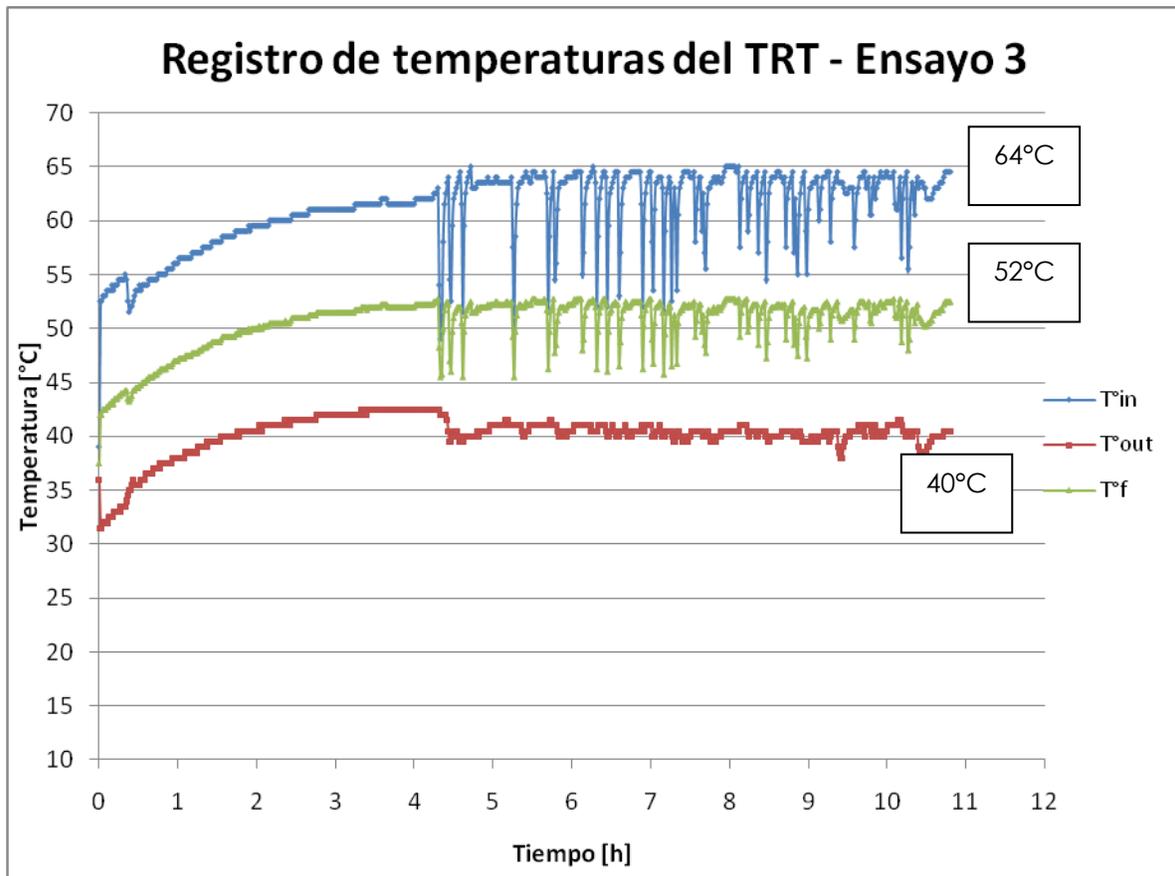


Figura 3.34 T°in, T°out y T°f en tramos de interés registradas en ensayo 3

En base a estos datos se obtuvo la conductividad térmica efectiva λ_{ef} . En la figura 3.35 se graficó en el eje de abscisas el logaritmo natural del tiempo y en el eje de ordenadas la diferencia entre la temperatura media del fluido T°f y la del suelo T°g. Esta última fue considerada 16°C. Un grado más que la temperatura encontrada en el perfil térmico del suelo.

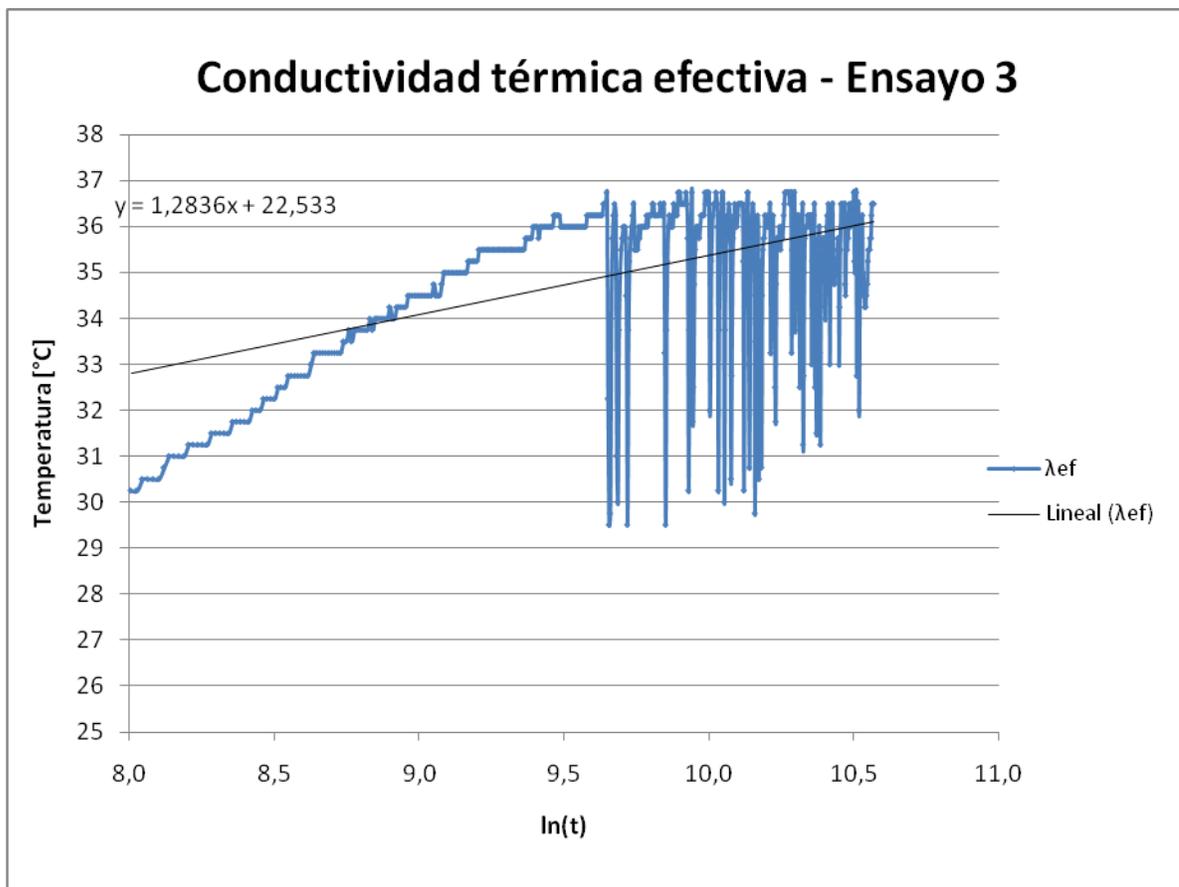


Figura 3.35 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 3

De la ecuación de la línea de tendencia se obtiene el valor de la pendiente $k = 1,2836 \text{ }^{\circ}C$.

Considerando los siguientes valores para el cálculo de la conductividad térmica se obtuvo lo siguiente:

$Q [W] = 4130$
 $L [m] = 41,3$
 $k [^{\circ}C] = 1,2836$

$\lambda_{ef} [W/m^{\circ}C] = 6,200$

De los datos de temperatura registrados también se obtuvo el valor de la resistencia térmica efectiva en el tiempo. El gráfico mostrado en la figura 3.36 detalla la evolución de la resistencia en el tiempo durante el ensayo, convergiendo a un valor de $0,370 \text{ m}^{\circ}C/W$.

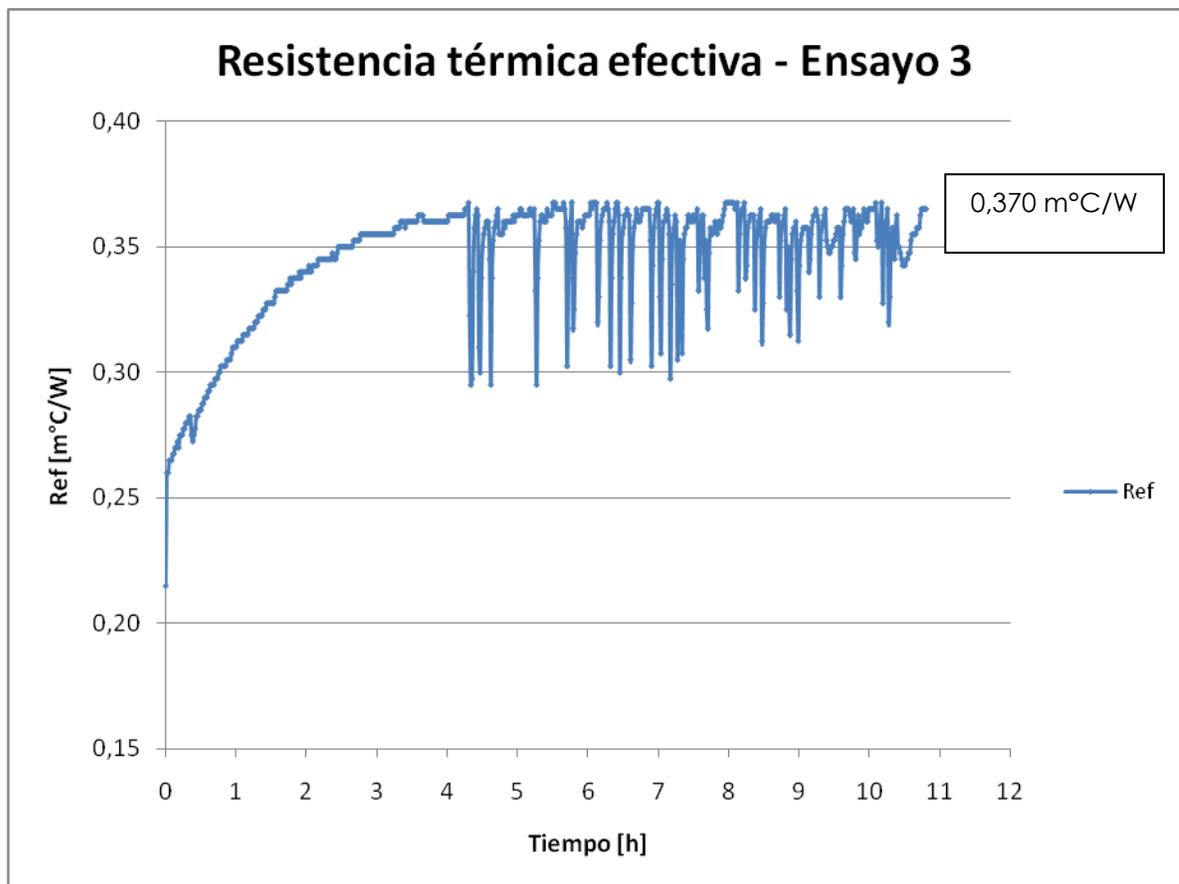


Figura 3.36 Resistencia térmica efectiva - Ensayo 3

- Ensayo 4

TRT en: Anclajes PE101 y PE100
 Desde: 01-09-2011 8:58
 Hasta: 02-09-2011 4:49
 Duración [hrs]: 26:01:00

El cuarto y último ensayo se realizó en el circuito que resulta de unir los circuitos instalados en los anclajes de la PE101 y PE100.

La figura 3.37 grafica las temperaturas de entrada, salida y del fluido que se registraron durante todo el periodo de duración del ensayo 4. Se puede observar que a partir de las 10 horas de iniciado el ensayo, las curvas convergen rápidamente a un valor constante. En círculos se identifican periodos en donde las temperaturas varían en gran magnitud debido a la irregularidad del caudal que ocasiona el apagado momentáneo del calefactor. Finalmente el

ensayo fue detenido después de 23 horas, Sin embargo, se considera el ensayo hasta las 20 horas desde su inicio.

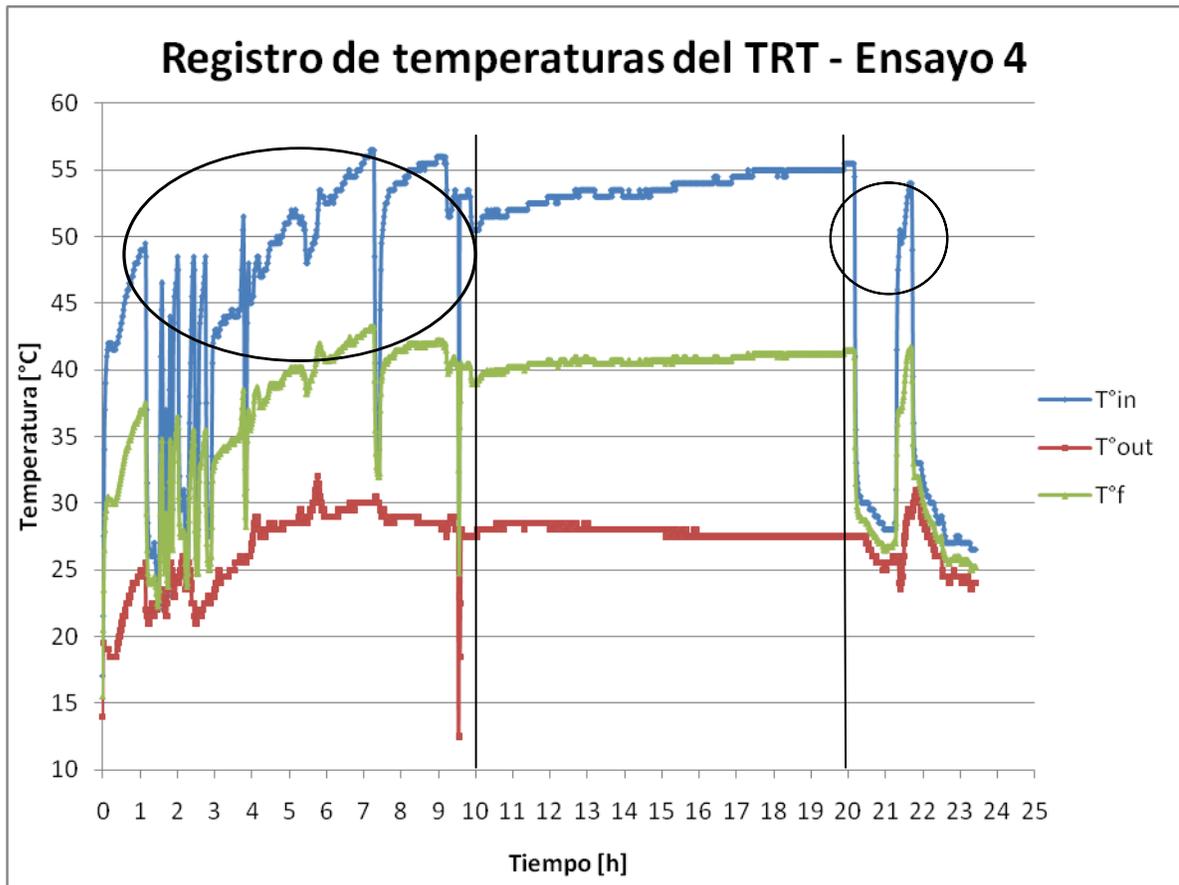


Figura 3.37 T°in, T°out y T°f registradas en ensayo 4

Los datos después de las 20 horas no son tomados en el análisis debido a que se trata en una discontinuidad del ensayo. Además, también se descartan los tramos de ensayo en donde se produce una disminución de la T°in producto del apagado del calefactor. El gráfico presentado en la figura 3.38 muestra el ensayo descartando esos datos. Además se identifican las temperaturas finales de cada curva:

$T^{\circ}in (t = 20 \text{ horas}) = 55^{\circ}C$

$T^{\circ}out (t = 20 \text{ horas}) = 27,5^{\circ}C$

$T^{\circ}f (t = 20 \text{ horas}) = 41,25^{\circ}C$

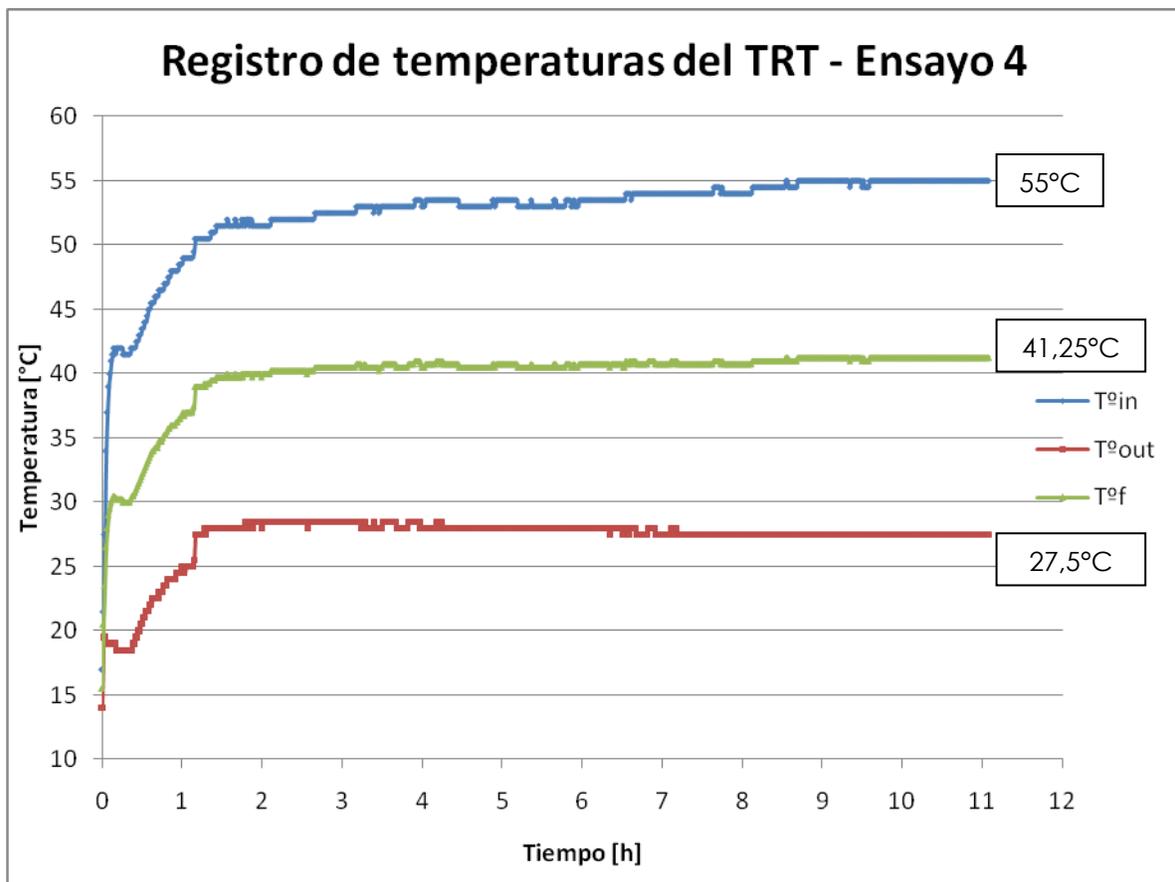


Figura 3.38 T°in, T°out y T°f en tramos de interés registradas en ensayo 4

En base a estos datos se obtuvo la conductividad térmica efectiva λ_{ef} . En la figura 3.39 se graficó en el eje de abscisas el logaritmo natural del tiempo y en el eje de ordenadas la diferencia entre la temperatura media del fluido T°f y la del suelo T°g. Esta última fue considerada 16°C. Un grado más que la temperatura encontrada en el perfil térmico del suelo.

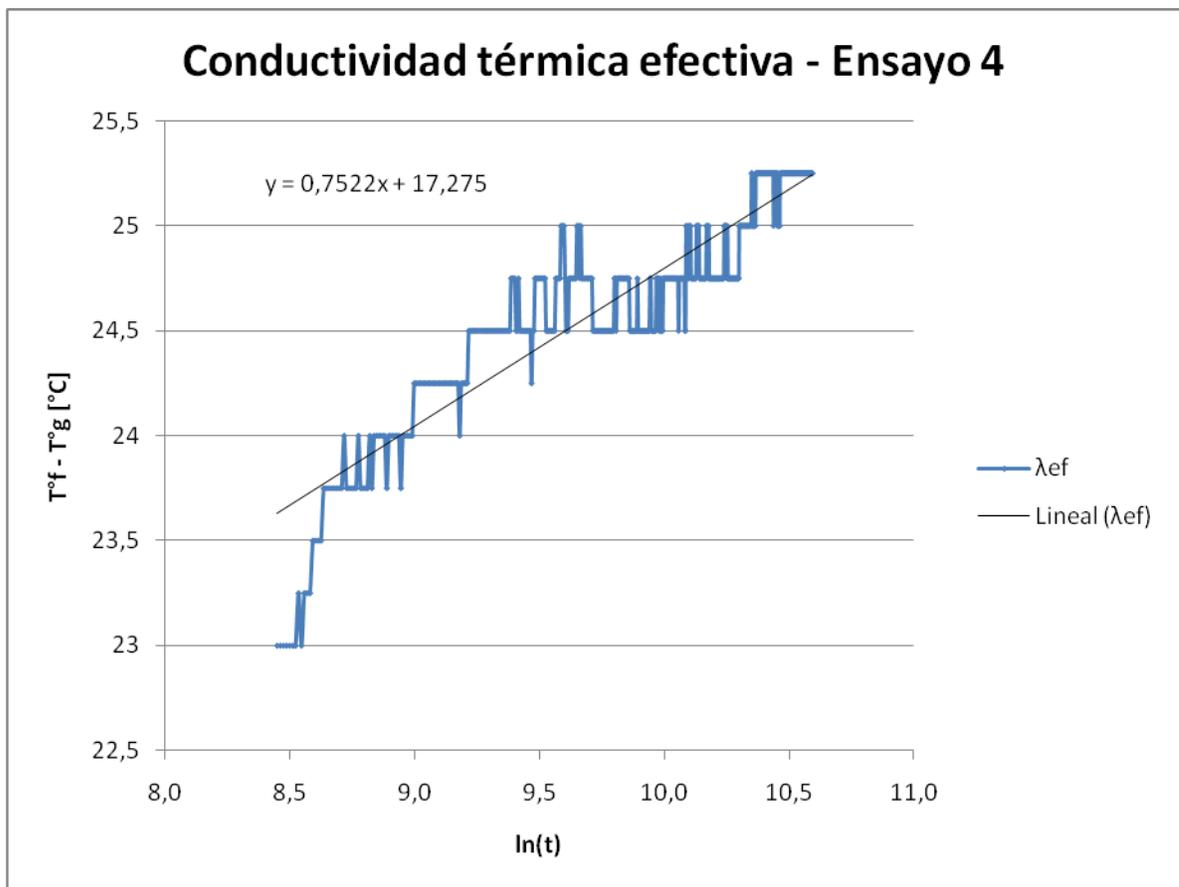


Figura 3.39 Línea de tendencia para cálculo de λ_{ef} – Ensayo 4

De la ecuación de la línea de tendencia se obtiene el valor de la pendiente $k = 0,7522$ °C.

Considerando los siguientes valores para el cálculo de la conductividad térmica se obtuvo lo siguiente:

Q [W] = 5011
 L [m] = 82,6
 k [°C] = 0,7522

 λ_{ef} [W/m°C] = 6,418

De los datos de temperatura registrados también se obtuvo el valor de la resistencia térmica efectiva en el tiempo. El gráfico mostrado en la figura 3.40 detalla la evolución de la resistencia en el tiempo durante el ensayo, convergiendo a un valor de 0,416 m°C/W.

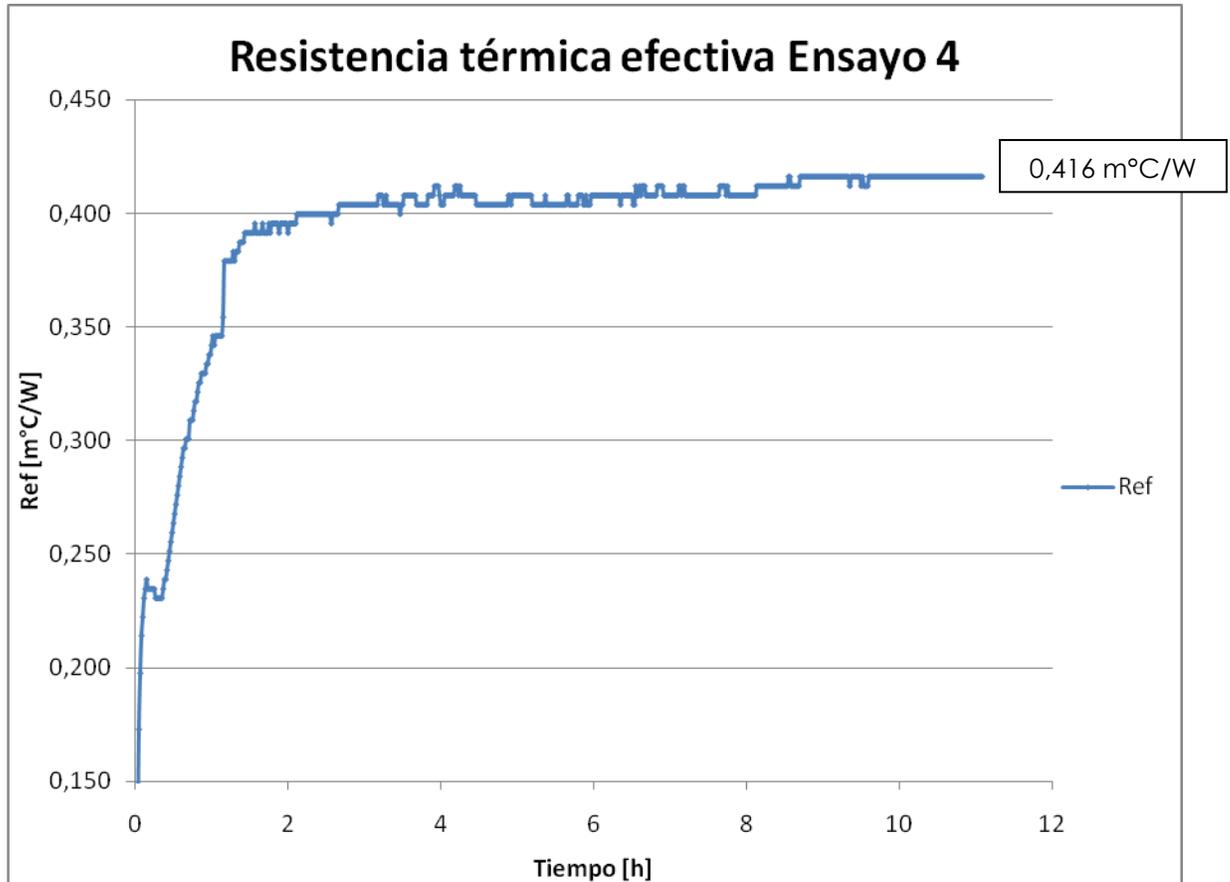


Figura 3.40 Resistencia térmica efectiva - Ensayo 4

En forma de resumen se entrega en la tabla 3.12 los valores de la conductividad térmica efectiva λ_{ef} y resistencia térmica efectiva R_{ef} encontrados para cada ensayo efectuado.

Tabla 3.12 Resumen de conductividad y resistencia térmica efectiva de los ensayos

Ensayo	Circuito	λ_{ef} [W/m°C]	R_{ef} [m°C/W]
1	Anclajes PE101	19,1	0,220
2	Anclajes PE101	2,536	0,293
3	Anclajes PE100	6,200	0,370
4	Anclajes PE101 y PE100	6,418	0,416

4. ANALISIS DE COSTOS (AC)

El objetivo de este capítulo, es identificar los costos asociados a la implementación de las PE y sus anclajes (An) con el fin de realizar una comparación porcentual entre los costos asociados a la implementación de la PE y los An, y los costos asociados a una PE y An "sin implementar". La figura 4.1 detalla el esquema de actividades desarrolladas en este capítulo para realizar el análisis de costos, el que se centró básicamente en las siguientes actividades:

El análisis de los costos se realizó para la metodología constructiva aplicada (MCA) y la metodología constructiva propuesta (MCP). Para cada una se identificó los costos asociados a la implementación correspondiente a las PE y los An.

Los costos fueron separados en directos e indirectos, y se explican a continuación:

Costos directos (CD): Corresponde a los costos que se derivan de los materiales, mano de obra, herramienta, maquinaria o labores directamente involucradas en la implementación de las PE y los An mediante el circuito de cañerías flexibles.

Los tipos de costos directos identificados en la investigación son básicamente dos:

- Insumos para la materialización del circuito de cañerías y para su implementación.
- mano de obra necesaria para realizar la implementación ya sea en las PE o en los anclajes.

Costos indirectos (CI): Corresponde a todos los gastos que se relacionan en forma indirecta con la construcción del proyecto, como mano de obra indirecta, utilización de equipo o maquinaria, etc.

Los costos indirectos asociados a la investigación se pueden clasificar en dos:

- La demora en los tiempos de ejecución que fueron necesarios para la implementación. Esta demora genera gastos en mano de obra y maquinaria paralizada.
- Gastos asociados a insumos indirectos para la correcta implementación de las PE y los anclajes. Este gasto corresponde a la viga de apoyo.

En base a estos costos, se realizó la comparación entre los costos asociados a la alternativa de implementación seleccionada y los costos asociados a la implementación efectuada en terreno, en donde se eligió una alternativa o forma de implementación para las PE y sus An eficiente según sus costos. Cabe destacar que el análisis de los costos es un estudio complementario para la elección final de la forma de implementación tanto para las PE como para los anclajes que se estudiaron en el capítulo 2.

Finalmente se analizó el aumento real porcentual de los costos que significa la implementación de una PE y los An. Para esto, en primer lugar, es necesario mencionar los costos unitarios en los que se basó este capítulo de análisis de costos^[17]. Estos se entregan en la tabla 4.1, y corresponde a los costos originales, es decir, sin implementación. Estos datos fueron otorgados por la empresa Pilotes Terratest S.A., y corresponden a los datos con los que se generó el presupuesto de entibación del proyecto Beauchef Poniente.

Tabla 4.1 Precios Unitarios de las PE y anclajes sin implementar (Polotes Terratest S.A. 2009).

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	P.U. (UF)
1	EXCAVACION PILAS	ML	1,200
2	HORMIGON PILAS	M3	2,200
3	ACERO PILAS	KG	0,029
4	ANCLAJES POSTENSADOS	ML	2,300

La tabla 4.1 entrega los precios unitarios para una PE y los anclajes postensados original del proyecto Beauchef Poniente, donde se realiza el estudio. Para el estudio, es de interés el costo total de una PE y sus respectivas tres líneas de anclaje (L1, L2 y L3) con el fin de poder comparar los costos de implementación con un valor base original, es por este motivo que en la tabla 4.2 se calcula y entrega el valor señalado

Tabla 4.2 Precio total de una PE y sus anclajes sin implementar.

ITEM	PRECIO UF
Total PE	171
Total Anclajes	219

Total UF	390
Total \$ (UF=21.981)*	8.572.590

*Fecha : 09/09/2011

De la tabla anterior se obtiene que el costo total para una PE y sus anclajes sin implementar, es decir, original del proyecto, es de 390 UF o aproximadamente \$8,5 millones.

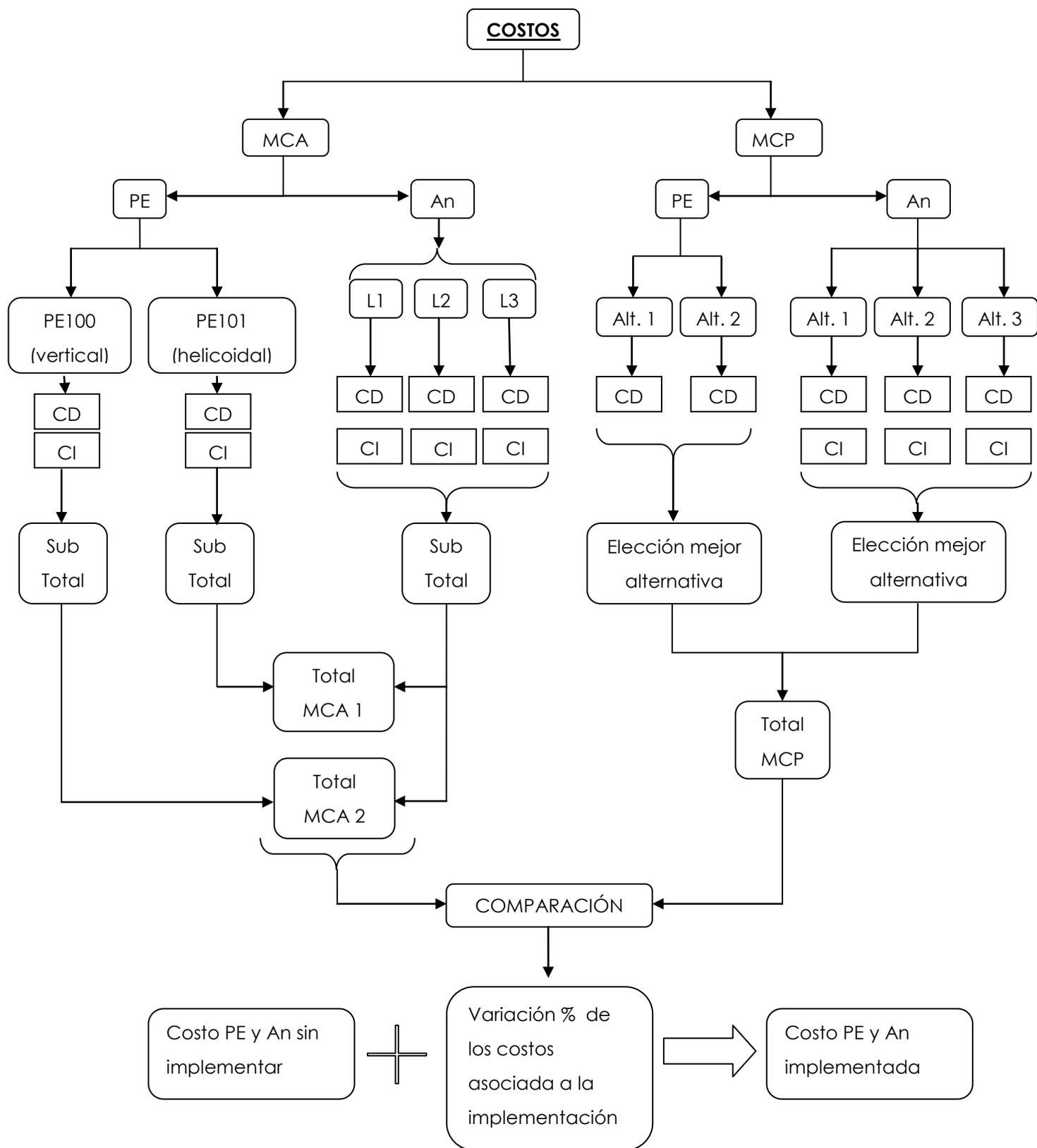


Figura 4.1 Esquema desarrollo capítulo de análisis de costos.

4.1 Costos generados por la implementación (MCA).

Los costos generados por la implementación, tanto de las PE como de los anclajes, están relacionados directamente a la MCA. A continuación se identifican los costos generados de la implementación realizada tanto para las PE100 y PE101 como para las 3 líneas de anclajes de cada una de las PE señaladas.

4.1.1 Costos generados por la implementación de las PE (según MCA).

Para poder realizar un análisis de costos fue necesario hacer un registro de todos los gastos inducidos para y por la implementación, es decir, se debió incluir los gastos que se sabían iban a ser necesarios para realizar la implementación y además los gastos que indujo la implementación de forma involuntaria, pero que fueron necesarios para su materialización. A continuación se detalla los costos para cada tipo de implementación realizada.

De las tablas 4.3 y 4.4 se puede observar que el mayor costo asociado a la implementación de las PE, tanto para la implementación de tipo helicoidal como vertical, corresponde a la viga de apoyo. Este costo se generó debido al impedimento de perforar las PE para el paso de los anclajes. Por otro lado, si obtenemos la diferencia entre el costo total de implementación entre la PE101 y PE100, se obtiene que la implementación mediante un circuito helicoidal (PE100) es menor en \$330.775 lo que corresponde a un 7% menos que el costo de implementación en forma vertical. Esto se debe a que la implementación mediante circuito helicoidal ocupa menos insumos y genera menos retraso cuando se conectan los circuitos de cañerías flexibles instalados en los dos cuerpos de armadura.

Tabla 4.3 Costos generados por la implementación según MCA para la PE 101 (vertical).

Costos Pila 101 (vertical)						
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos Mano de obra		Unid			591.889
		Obrero	\$/h	2500	12	30.000
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000	12	144.000
Indirectos:	Demora	Colocación de la armadura	\$/h	200000	1	200.000
		Retiro de camisa	\$/h	200000	0,5	100.000
	Extra	Viga de apoyo	Unid	2500000	1,5	3.750.000

Total [\$] (IVA incluido) \$4.815.889

Tabla 4.4 Costos generados por la implementación según MCA para la PE 100 (helicoidal).

Costos Pila 100 (helicoidal)						
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos Mano de obra		Unid			395.114
		Obrero	\$/h	2500	12	30.000
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000	12	144.000
Indirectos:	Demora	Colocación de la armadura	\$/h	200000	0,33	66.000
		Retiro de camisa	\$/h	200000	0,5	100.000
	Extra	Viga de apoyo	Unid	2500000	1,5	3.750.000

Total [\$] (IVA incluido) \$4.485.114

4.1.2 Costos generados por la implementación de los anclajes (según MCA).

Los costos indicados en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 representan los costos totales (directos mas indirectos) asociados a la implementación aplicada para cada línea de anclaje, ya sea para la PE101 como para la PE100. Se puede observar que los gastos asociados a las dos líneas inferiores son menores, ya que la longitud del anclaje es menor, por ende se necesitan menos

metros lineales de cañería y menos longitud en donde se debe realizar la perforación mayor que la de una PE sin ser implementada.

Tabla 4.5 Costos generados por la implementación de la primera línea de anclaje (L1) según MCA.

Costos de implementación de la primera línea de Anclaje para PE101 y PE100						
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos		Unid			94.740
	Mano de obra	Obrero	\$/h	2500	3	7.500
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000	3	36.000
Indirectos:	Perforación	Diámetro mayor	\$/ml	10000	20	200.000
Total [\$]						338.240

Tabla 4.6 Costos generados por la implementación de la segunda línea de anclaje (L2) según MCA.

Costos de implementación de la segunda línea de Anclaje para PE101 y PE100						
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos		Unid			87.561
	Mano de obra	Obrero	\$/h	2500	3	7.500
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000	3	36.000
Indirectos:	Perforación	Diámetro mayor	\$/ml	10000	17	170.000
Total [\$]						301.061

Tabla 4.7 Costos generados por la implementación de la tercera línea de anclaje (L3) según MCA.

Costos de implementación de la tercera línea de Anclaje para PE101 y PE100						
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos		Unid			78.587
	Mano de obra	Obrero	\$/h	2500	3	7.500
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000	3	36.000
Indirectos:	Perforación	Diámetro mayor	\$/ml	10000	12	120.000
Total [\$]						242.087

De las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se puede observar que la mayor parte de los costos generados por la implementación de los anclajes, está dada por el ítem de perforación, correspondiente a un costo indirecto. Por ejemplo, en la tabla 4.5, se indica que en perforación se generó un costo de \$200.000, de un total de los costos de implementación generados por la línea 1 de anclaje de \$338.240, es decir, un 59% del costo total de implementación generado por la línea 1 de anclaje, corresponde a perforación.

En resumen, el costo total (directos + indirectos) para cada línea de anclaje y por consiguiente para el grupo de las tres líneas de los anclajes de una PE, se entrega en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Costo total generado por la implementación para cada línea de anclaje en las PE101 y PE100.

Nivel de anclaje	Total anclaje [\$]
1	338.240
2	301.061
3	242.087
Total [\$]	881.387

En resumen, los costos totales generados por la implementación tanto para las PE101 y PE100, como para las líneas de anclajes, se entregan en la tabla 4.9:

Tabla 4.9 Resumen de costos totales generados por la implementación de PE y anclajes.

Elemento	Costo total [\$]
PE101 (vertical)	4.815.889
PE100 (helicoidal)	4.485.114
Anclajes (3 líneas)	881.387

En general se tiene dos grupos, la PE100 con sus tres líneas de anclajes y la PE101 con sus respectivas tres líneas de anclaje. La tabla 4.10, reúne los costos y los entrega para cada grupo.

Tabla 4.10 Costos totales generados por la implementación para cada PE con sus respectivas tres líneas de anclaje.

Grupo	Costo total [\$]
PE101 + anclajes	5.697.276
PE100 + anclajes	5.366.501

4.2 Costos de implementación asociados a la MCP

Los costos identificados a continuación, son generados de la implementación según la MCP para las PE y los anclajes.

4.2.1 Costos de implementación asociados a la MCP para la implementación de las PE.

Para la implementación de las PE se proponen dos alternativas:

1. Implementación de las PE mediante un circuito de cañerías flexible con una distribución solidaria a la armadura de forma vertical.
2. Implementación de las PE mediante un circuito de cañerías flexibles con una distribución solidaria a la armadura de forma helicoidal y vertical en las zonas de los anclajes.

En el análisis de costos no se consideró lo siguiente:

- Los costos asociados a la utilización de una maquinaria con una mayor pluma, capaz de levantar toda la armadura de una sola vez.
- Los costos asociados a la disminución de viajes de la maquinaria que coloca la armadura, ya que de dos viajes (dos cuerpos) se pasó a un solo viaje (un solo cuerpo) en el montaje.

Estos costos no fueron considerados por la dificultad de su dimensionamiento y su poca influencia.

Las tablas 4.11 y 4.12 indican los costos asociados a la implementación de las PE basándose en la MCP para las dos alternativas de implementación propuestas. En donde se puede observar que la implementación propuesta de una PE bajo un circuito helicoidal y vertical en las zonas de los anclajes (alternativa 2), genera menos costos que bajo una implementación mediante un circuito de cañerías flexibles en forma vertical (alternativa 1). Esta diferencia corresponde a \$124.188 y representa un 20% menos en costos de implementación en la PE.

Tabla 4.11 Costos de implementación asociados a la MCP para una PE en forma vertical (alternativa 1).

Costo Implementación vertical basado en MCP						
	Item	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos		Unid			519.302
	Mano de obra	Obrero	\$/h	2500	6,5	16250
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000		6,5
Total [\$]						613.552

Tabla 4.12 Costos de implementación asociados a la MCP para una PE en forma helicoidal y vertical en zona de anclajes (alternativa 2).

Costo Implementación helicoidal basado en MCP.						
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo
Directos:	Insumos		Unid			395.114
	Mano de obra	Obrero	\$/h	2500	6,5	16250
		Ingeniero supervisor	\$/h	12000		6,5
Total [\$]						489.364

Por consecuencia, la alternativa seleccionada para la implementación propuesta, según los costos de implementación, corresponde a una implementación de la PE mediante un circuito helicoidal y vertical en la zona de los anclajes, es decir, la alternativa 2.

4.2.2 Costos de implementación asociados a la MCP para los anclajes.

Para la implementación de los anclajes se proponen 3 alternativas, por ende el estudio y desglose de los costos asociados a la implementación se realizara para cada una, las alternativas propuestas son las siguientes:

1. Implementación de los anclajes con la utilización de hombro de anclaje de hormigón armado.
2. Implementación de los anclajes con la utilización de hombro de anclaje de acero.
3. Implementación de los anclajes sin la utilización de hombro de anclaje.

Las tablas 4.13, 4.14 y 4.15 muestran los costos asociados a la implementación de las tres líneas, basándose en las alternativas de implementación propuestas.

Se puede observar que la mayor parte de los costos corresponde a la necesidad de un mayor diámetro de perforación que permita materializar el retorno en forma de “U” en el extremo interior del circuito de cañerías. Esto verifica lo dicho en el capítulo de Balance Térmico en donde se menciona que el costo asociado a la perforación es el más relevante dentro de los costos de inversión de un sistema geotérmico.

Tabla 4.13 Costos de implementación asociados a la MCP utilizando hombro de hormigón armado (alternativa 1).

Costos de implementación de las 3 líneas de anclaje, Alternativa: Con hombro de HA.							
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo	
Directos:	<u>Insumos</u>	Línea 1	Unid			94.740	
		Línea 2	Unid			87.561	
		Línea 3	Unid			78.587	
	<u>Mano de obra</u>	<u>Obrero:</u>	Línea 1	\$/h	2.500	7	17.500
			Línea 2	\$/h	2.500	7	17.500
			Línea 3	\$/h	2.500	7	17.500
		<u>Ingeniero supervisor:</u>	Línea 1	\$/h	12.000	7	84.000
			Línea 2	\$/h	12.000	7	84.000
			Línea 3	\$/h	12.000	7	84.000
Indirectos:	<u>Perforación</u>	<u>Diámetro mayor:</u>					
		Línea 1	\$/ml	10.000	20	200.000	
		Línea 2	\$/ml	10.000	17	170.000	
		Línea 3	\$/ml	10.000	12	120.000	
	<u>Hombro de anclaje</u>	<u>De Hormigón armado:</u>	Unid		50.000	3	150.000
Total [\$]						1.205.387	

**Tabla 4.14 Costos de implementación asociados a la MCP utilizando hombro de acero
(alternativa 2).**

Costos de implementación de las 3 líneas de anclaje, Alternativa: Con hombro de acero.							
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo	
<u>Directos:</u>	<u>Insumos</u>	Línea 1	Unid			94.740	
		Línea 2	Unid			87.561	
		Línea 3	Unid			78.587	
	<u>Mano de obra</u>	<u>Obrero:</u>	Línea 1	\$/h	2.500	2	5.000
			Línea 2	\$/h	2.500	2	5.000
			Línea 3	\$/h	2.500	2	5.000
		<u>Ingeniero supervisor:</u>	Línea 1	\$/h	12.000	2	24.000
			Línea 2	\$/h	12.000	2	24.000
			Línea 3	\$/h	12.000	2	24.000
		<u>Indirectos:</u>	<u>Perforación</u>	<u>Diámetro mayor:</u>			
Línea 1	\$/ml			10.000	20	200.000	
Línea 2	\$/ml			10.000	17	170.000	
Línea 3	\$/ml		10.000	12	120.000		
<u>Hombro de anclaje</u>	<u>De acero</u>			Unid	245.000	3	735.000
Total [\$]						1.572.887	

Tabla 4.15 Costos de implementación asociados a la MCP sin hombro de anclaje (alternativa 3).

Costos de implementación de las 3 líneas de anclaje, Alternativa: Sin hombro de anclaje.							
	Ítem	Especificación	Unidad	Costo Unid	Cantidad	Costo	
Directos:	<u>Insumos</u>	Línea 1	Unid			94.740	
		Línea 2	Unid			87.561	
		Línea 3	Unid			78.587	
	<u>Mano de obra</u>	<u>Obrero:</u>	Línea 1	\$/h	2.500	4	10.000
			Línea 2	\$/h	2.500	4	10.000
			Línea 3	\$/h	2.500	4	10.000
		<u>Ingeniero supervisor:</u>	Línea 1	\$/h	12.000	4	48.000
			Línea 2	\$/h	12.000	4	48.000
			Línea 3	\$/h	12.000	4	48.000
	Indirectos:	<u>Perforación</u>	<u>Diámetro mayor:</u>				
Línea 1			\$/ml	10.000	20	200.000	
Línea 2			\$/ml	10.000	17	170.000	
Línea 3			\$/ml	10.000	12	120.000	
<u>Hombro de anclaje</u>		<u>Sin hombro de anclaje</u>	Unid	245.000	0	0	
Total [\$]						924.887	

En la tabla 4.16 se resumen los costos totales de implementación para cada alternativa propuesta.

Tabla 4.16 Costos totales de implementación de los anclajes por alternativa propuesta.

Implementación	Costo total [\$]
Alternativa 1	1.205.387
Alternativa 2	1.572.887
Alternativa 3	924.887

De la tabla 4.16 se observa que la alternativa de implementación propuesta que genera un menor costo corresponde a la MC sin la utilización de hombro de anclaje (alternativa 3). Esta MC es menor en \$280.500 con respecto a la alternativa con hombro de anclaje de hormigón armado (alternativa1), lo que representa un 23% menos en los costos de implementación. Ahora

si se compara con la alternativa de implementación con la utilización de hombro de anclaje de acero (alternativa2), se observa que es menor en \$648.000, lo que representa un 41% de los costos de implementación.

En resumen, la alternativa seleccionada para la implementación de los anclajes corresponde a la alternativa 3, es decir, la implementación sin la utilización de hombro de anclaje, con un costo de implementación de \$924.887 ó 42 UF (valor UF 09/09/2011).

4.3 Comparación de costos asociados a la MCA y MCP seleccionada.

A continuación se presenta una comparación entre los costos de implementación asociados a cada alternativa seleccionada, tanto para las PE como para los anclajes y los costos de implementación asociados a la implementación aplicada.

Tabla 4.17 Resumen de los costos asociados a la implementación aplicada y de las alternativas propuestas seleccionadas.

elemento	Aplicada		Propuesta seleccionada
	PE101 + anclajes	PE100 + anclajes	
PE	4.815.889	4.485.114	489.360
Anclaje	881.387	881.387	924.887
Total [\$]	5.697.276	5.366.501	1.414.247

La tabla 4.17 entrega un resumen de los costos generados por la implementación aplicada en las PE y los anclajes y los costos de implementación de las alternativas seleccionadas.

De la tabla 4.17 se puede observar que los costos de implementación generados por la alternativa propuesta corresponden a \$1.414.247. Este costo es menor que el costo generado de la implementación realizada en la PE100 y sus tres líneas de anclajes en \$3.952.250. Lo que representa un 74% menos en los costos. Esta diferencia se debe especialmente a que la MCP no demanda la necesidad de ocupar la viga de apoyo, permitiendo la perforación de la PE con la diamantina, ya que el paso del circuito de cañerías en la zona de los anclajes es en forma vertical, caso que era imposible en la MCA.

Finalmente se entrega la tabla 4.18, en donde se indica en primer lugar el costo asociado a la implementación de la PE mediante la MCP, luego se indica el costo asociado a la implementación de los anclajes basados en la MCP. Sumados estos dos costos, se obtiene el valor señalado en la tercera columna, el que es comparado con el costo propio de construir una PE y sus anclajes sin ser implementados, obteniéndose el aumento porcentual real en el que se debe incurrir para obtener una PE y sus anclajes implementados, el que en este caso corresponde a un 17%.

Tabla 4.18 Comparación de costos de implementación según MCP seleccionada v/s costo propio de construcción de una PE y sus anclajes.

Costo implementación propuesta PE [\$]	Costo implementación propuesta anclajes [\$]	Costo total implementación propuesta PE y anclajes [\$]	Costo propio de construcción de una PE + anclajes [\$]	% de aumento en los costos para la implementación de una PE y sus anclajes [%]
489.364	924.887	1.414.251	8.497.743	17

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las conclusiones que de la investigación se derivan, y que se exponen en las siguientes páginas, están ordenadas de la siguiente forma. Primero se dedica un párrafo al supuesto adoptado sobre el perfil térmico de la PE en función de la profundidad, en donde se adoptó que éste era comparable con el perfil térmico del suelo. Luego se discuten las conclusiones obtenidas del capítulo de metodologías constructivas, en donde se analizan principalmente los efectos y problemas que surgieron de la metodología constructiva aplicada MCA y las soluciones encontradas a estos problemas. Esto dio origen a la metodología constructiva propuesta (MCP), con el objetivo final de lograr una implementación eficiente en tiempos y costos. De la mano de lo anterior, se concluye sobre los costos derivados de la implementación tanto para la MCA como para la MCP. Finalmente, se concluye sobre el capítulo de balance térmico, en donde se resumen las propiedades térmicas del suelo calculadas, temperatura promedio del suelo (T^g), conductividad térmica efectiva (λ_{ef}) y resistencia térmica efectiva (R_{ef}), para luego entregar algunos datos de potencia térmica del sistema instalado. Además, se proponen algunas investigaciones que servirían de complemento al estudio realizado.

Las temperaturas registradas en el perfil térmico de la PE arrojan un promedio entre los 16,5 y 26,5 m de 7,3°C, con un máximo registro de 8,8 °C a los 25,6 y 26,5 m. Este valor dista bastante del promedio de temperaturas obtenido en el perfil térmico del suelo, que fue de 15,3°C entre los 3 y 6 m de profundidad, pero son comparables con los valores de temperatura del suelo obtenidos a una profundidad de 0,5 m (8,8 °C). Por otro lado, la condición actual de avance de la obra Edificio Beauchef Poniente, mantiene una cara de las PE expuestas a la excavación de la obra, condición que lleva un tiempo de aproximadamente 18 meses. Esto permite concluir, que las temperaturas registradas en el perfil térmico de la PE, corresponden a una condición actual de superficie, es por eso que son comparables con las lecturas del perfil térmico del suelo cercanas a la superficie (50 cm). Estos datos deberían cambiar con el tiempo a medida que el avance de la obra tape la superficie de las PE actualmente expuestas teniéndose otras condiciones de borde.

En base al estudio realizado sobre las metodologías constructivas, se concluye que, en la metodología constructiva aplicada MCA se identificaron todos los problemas y actividades que fueron necesarias integrar para poder realizar la implementación de las PE y los anclajes. En base a esa identificación, se logró proponer una metodología constructiva que permite la implementación de las PE y los anclajes de la manera más eficiente posible. A esta metodología

se le llamó metodología constructiva propuesta (MCP) y consta principalmente de 3 etapas, diseño, implementación y construcción. Con esto se logró en primer lugar, incorporar la implementación de las PE y los anclajes al diseño de éstas. En segundo lugar, realizar la implementación de las PE y los anclajes en un lugar específico que otorgue todas las comodidades para lograr un trabajo en conjunto y secuencial entre el armado y la implementación, ceñido a un plan de acción y control según las necesidades de avance de la obra, separando de esta manera la implementación de la construcción.

La implementación propuesta para las PE, finalmente corresponde a un circuito de cañerías con una distribución, en la mayor parte de la armadura, de forma helicoidal, y algunos tramos con una distribución vertical. Los tramos que contemplan una distribución vertical corresponden a la zona donde se ubican los anclajes. Esto tiene como finalidad, evitar el daño que pueda ocasionar la diamantina a las cañerías cuando perfora la PE para permitir el paso del anclaje. Por el contrario, para los tramos ubicados entre los niveles de anclajes, se propone implementar el circuito solidario a la armadura mediante una distribución helicoidal. Con esto, en los tramos donde se ubican los anclajes sólo pasarán dos cañerías, una por cada lado de la armadura, y los tramos entre anclajes serán aprovechados de mejor forma con una distribución helicoidal de la cañería.

Del estudio se concluye que la implementación de PE y sus respectivos anclajes es factible según la metodología constructiva aplicada, sin embargo, esta forma de implementación generó altos costos, los que se debieron principalmente a la necesidad de una viga de apoyo para no perforar las PE y así no dañar las cañerías que la recorren. Los costos generados por la MCA fueron de \$5.368.501, de los cuales \$3.750.000 corresponde a la viga de apoyo, es decir, el 70% de los costos totales de la implementación. Es por este motivo que la factibilidad de perforar la PE, para permitir el paso del anclaje, fue de vital importancia a la hora de proponer una metodología constructiva de implementación que fuera eficiente en costos y factible bajo las experiencias aprendidas en la implementación ya realizada. Esto es lo que se desarrolló y consiguió finalmente en la MCP, la que permite el paso del anclaje a través de la PE, haciendo la implementación eficiente en costos y al mismo tiempo posible bajo una metodología constructiva que no representa una invasión a la construcción original de las PE y los anclajes. Esto se pudo observar en el capítulo de análisis de costos, donde se obtuvo, para la implementación de una PE, bajo la MCP, un costo de implementación de \$489.364, es decir, un 89% menos que sólo los costos de implementación para la PE bajo la MCA y un 92% menos que los costos totales (PE más anclajes) de implementación bajo la MCA.

El costo total asociado a la implementación de los anclajes, bajo la MCA, fue de \$881.387 (para los tres niveles), y para la MCP de \$924.887, es decir, la implementación de los anclajes bajo la MCP es mayor en \$43.500, un 5% más que lo registrado en la MCA. Este aumento en los costos se debe a dos cosas, la primera corresponde a la necesidad de un fitting especial para realizar el retorno al final del circuito, y la segunda corresponde a la necesidad de supervisión en la etapa de construcción del anclaje.

Si se comparan los costos generados en total, por la MCP para la PE y los anclajes, se obtiene que los costos de construcción de la PE y sus respectivos anclajes, aumentan en un 17% para poder obtener una PE y anclajes implementados mediante un sistema geotérmico como el estudiado y propuesto en esta investigación. Este 17% equivale a \$1.414.251. Si proyectamos este valor a la implementación de todas las PE y los anclajes proyectados en la entibación del proyecto Beauchef Poniente, es decir, en las 111 PE y sus respectivos niveles de anclaje, se obtiene que los costos de implementación del sistema geotérmico en todo el proyecto, es de \$156.981.872, es decir, aproximadamente 7140 UF (valor UF 09/09/2011).

En base a la investigación del balance térmico, se puede concluir que, el perfil térmico del suelo obtenido para el primer periodo (mes de junio – comienzo estación de invierno) promedió una temperatura entre los 3 y 6 metros de profundidad de 15,3°C. De la misma manera, el perfil térmico del suelo obtenido en el segundo periodo (septiembre – fin de estación de invierno) promedió una temperatura entre los 3 y 6 metros de 13,8°C. Esta variación entre los perfiles se debe a un descenso de la masa de calor del suelo debido al paso de la estación de invierno, reflejada como una disminución de las temperaturas en los metros cercanos a la superficie, en este caso de 1,5°C (diferencia entre las dos temperaturas promedio indicadas anteriormente). Sin embargo, el perfil térmico del suelo obtenido, permite concluir que a una profundidad entre 3 y 6 metros ya se cuenta con una temperatura promedio del suelo de 15,3°C para el primer periodo y 13,8°C para el segundo. Promedios que corresponderían a una cota inferior respecto a la curva de perfil térmico del suelo encontrada en la literatura (figura 3.1), por ende si estas temperaturas ya son favorable para un sistema geotérmico, su ubicación en la curva del perfil permite suponer que el escenario podría ser aún más favorable.

De los cuatro test de respuesta térmica (TRT) realizados, se calcularon valores de la conductividad térmica efectiva (λ_{ef}) y respuesta térmica efectiva (Ref) con una gran variabilidad, lo que se debe principalmente a lo complicado que fue mantener un caudal constante durante la realización del TRT. A consecuencia de esto, se produjo un funcionamiento

intermitente del calefactor eléctrico (ciclos de prendido y apagado), lo que ocasiona un consumo irregular por parte del calefactor de difícil registro, agregando incertidumbre al valor de la potencia entregada al fluido. Sin embargo, en el ensayo N°2 efectuado en el circuito que recorre los anclajes de la PE101, fue posible mantener el caudal en forma constante por algunos periodos, obteniendo valores de la conductividad térmica efectiva (λ_{ef}) y resistencia térmica efectiva (R_{ef}) comparables con los valores encontrados en la literatura. Estos valores corresponde a $\lambda_{ef}=2,536 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y $R_{ef}=0,293 \text{ m}^\circ\text{C/W}$.

Los circuitos instalados en los anclajes de las PE101 y PE100 tienen un largo total de aproximadamente 70 metros cada uno, sin embargo 43,1 m de este circuito corresponden a la longitud total de perforación con cañerías que recorren los anclajes, el resto del circuito corresponde a tramos de conexión entre los tres niveles de anclaje y de retorno a la superficie. Si bien estos tramos están cubiertos con aislante térmico, se desconoce la eficiencia actual de este aislante. Por ende, los altos valores de conductividad térmica encontrados en los TRT son una mezcla entre la disipación de calor lograda en el suelo, y la disipación lograda en los tramos libres con aislante térmico. Condición que debería cambiar a medida que la obra Beauchef Poniente avance y los tramos libres del circuito con aislante térmico queden cubiertos con hormigón entre el edificio y el suelo.

Para el ensayo N°2, se disipó una potencia de 5011 W a lo largo del circuito (43,1 m), lo que induce a una potencia por metro lineal de cañería instalada de 116 W/ml. Si bien no fue posible obtener un valor de potencia disipada para las PE, es posible generalizar, a modo de ejemplo, el valor antes señalado a la implementación de todas las PE y los anclajes del proyecto Beauchef Poniente. Por ende, si se consideran las 111 PE de 28 m cada una y sus respectivos niveles de anclaje, con una longitud de 43 m aproximadamente, se obtendría un potencial instalada del sistema geotérmico de 915 kW. Un valor encontrado en la literatura (Econo-heat-Chile, 2010) indica que 2kW son suficiente para la calefacción de un área entre 18 y 20 m², en base a este dato, el área posible de calefacción en base al potencial entregado por el sistema geotérmico estudiado, iría entre los 8.235 a 9.150 m², lo que corresponde a un 19% del área total del edificio Beauchef Poniente (dato comparado incluyendo los área de pisos de estacionamiento). Este valor podría ser aún mayor una vez el edificio tape los tramos libres de cañerías que recorren los anclajes y se encuentran en estos momentos con aislante térmico. En ese caso, la longitud del sistema de cañerías implementado en los anclajes pasaría de 43 a 70 metros lineal.

A modo de apoyo y complemento al estudio realizado se proponen las siguientes investigaciones o pasos a seguir:

- Realizar un estudio estadístico sobre el giro real de la armadura de las PE que se produce en el retiro de la camisa después del hormigonado.
- Se propone un estudio sobre la posible variación del rendimiento del sistema geotérmico instalado según las distintas temporadas del año y las distintas etapas de avance que se tenga en la obra y que modifican las condiciones de borde.
- Para el perfil térmico del suelo se propone realizar un registro de los distintos perfiles que se obtendrían a lo largo del año, abarcando los inicios y finales de cada estación (otoño, invierno, primavera y verano). Con el objetivo de verificar si la masa de calor desciende o asciende según la temporada.
- Para el perfil térmico de la PE, se propone realizar un registro en función del avance de la obra con el objetivo de obtener las variaciones de las temperaturas según la condición de borde del momento. De la misma forma se propone la implementación de una PE con nuevos sensores térmicos a distintas alturas, y a medida que el avance de la obra lo permita, con el fin de obtener nuevos datos del perfil térmico.
- Se propone realizar mediciones de TRT a largo plazo, que abarque un periodo mayor de funcionamiento y por ende de disipación de calor del sistema geotérmico.
- En base al funcionamiento del sistema de adquisición de datos del equipo móvil del TRT, y a los resultados obtenidos de los ensayos, se propone realizar mejoras al equipo que permitan una autonomía en el registro de datos, especialmente en el control de un régimen permanente del caudal durante el periodo del test y a la medición exacta de la potencia entregada al calefactor eléctrico.
- En base al supuesto de pozo vertical y de transferencia de calor en 2D adoptado al funcionamiento del sistema instalado en las pilas de entibación en los anclajes, se propone realizar un análisis numérico computacional que modele el comportamiento real de la transferencia de calor entre el sistema geotérmico y el suelo.

En conclusión, la implementación de pilas de entibación y sus respectivos anclajes postensados con un sistema geotérmico es factible bajo la metodología constructiva propuesta, la que señala, para los anclajes, una implementación sin la necesidad de utilizar un hombro, y para las pilas de entibación, la implementación mediante un circuito de cañerías flexibles con una distribución helicoidal y vertical solo en las zonas de paso de los anclajes. Por otro lado, los

costos asociados a la implementación generan un aumento del 17% sobre los costos originales de construcción de las pilas de entibación y anclajes. Por último, el perfil térmico del suelo, permite suponer que las condiciones de éste son favorables para la instalación de un sistema geotérmico, con una temperatura promedio del suelo entre los 3 y 6 metros de profundidad de 15,3°C. De la misma forma, el valor de conductividad y resistencia térmica efectiva del sistema geotérmico instalado, son de 2,536 W/m°C y 0,293 m°C/W respectivamente, valores muy cercanos a los encontrados en la literatura.

6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

1. NCh 1079-2008. "Arquitectura y construcción – Zonificación climática habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico". Instituto Nacional de Normalización. 4-5 P.
2. Felipe Victorero C. 2008. Estudio del comportamiento térmico de la vivienda de emergencia o mediagua. Un techo para Chile. 4 p.
3. Mario Ramírez E. 2010, El clima de Temuco. Grupo física de la atmósfera de la Universidad Católica de Temuco. URL accesado 15/20/2010:
<http://www.uctemuco.cl/meteorologia/climatco.htm>
4. NCh 1079-2008. "Arquitectura y construcción – Zonificación climática habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico". Anexo C. 13 p.
5. Wikipedia. 2010. Inercia térmica. Wikipedia La enciclopedia libre. URL accesado 17/07/2011:
http://es.wikipedia.org/wiki/Inercia_t%C3%A9rmica
6. Rolf Katzenbach. Octubre 2008. Energía geotérmica superficial – estado de la técnica e investigación en Alemania. 7 p.
7. Burkhard Sanner, 2001. Shallow Geothermal Energy. GHC Bulletin. 19-22 p.
8. GEOMAD. 2011. Test de conductividad. Proyectos e instalaciones geotérmicas. URL accesado 13/07/2011: <http://www.geomad.es/blog-noticias/44-test.html>
9. Girod Geotermia. 2008. Test de respuesta térmica. 1p.
10. Mostafa H. Sharqawy "et al". 2009. First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia. Renewable Energy. 2219 p.
11. Pilotes Terratest. Edificio PBBP Fac. Ingeniería Universidad de Chile Entibación y Socializado Detalles anclajes. Plano N° 09132-ANC-DET-003. Fecha: 17/12/2009. Revisión N° 0.
12. Pilotes Terratest. 2010. Pilotes de extracción. Pilotes. 4-5 p.
13. Piotes Terrates. 2009. Edificio PBBP Fac. Ingeniería Universidad de Chile Entibación y Socializado Secuencia de ejecución. Plano N°09132-ANC-EJEC-005. Revisión N° 0.
14. Pilotes Terratest. Edificio PBBP Fac. Ingeniería Universidad de Chile Entibación y Socializado Detalles anclajes. Plano N° 09132-ANC-ARM-004B. Fecha: 17/12/2009. Revisión N° 0.
15. Pilotes Terratest. "Detalle apoyo de hormigón a 20°".
16. Pilotes terratest. 2010. Anclajes de gran capacidad. Anclajes. URL accesado 07/06/2011:
<http://www.terratest.cl/interior/pdf/CAT-A-01-rev%203.pdf>
17. Edward D. Wright, O'Brien-Kreitzberg. 1994. Constructability Guide. 3-4 p.

18. Paulson Boyd C. 1976. Designing to reduce construction costs. Construction Division. Vol 102. N°4 587-592 p.
19. REHAU. Enero 2008. Sistema RAUGEO para el aprovechamiento geotérmico, información técnica 827600 ES. Diseño de una instalación geotérmica. 16 p.
20. Casa Royal. 2011. Productos. LM35DZ. URL accesado (05/09/2010):
<http://www.casaroyal.cl/productos.aspx>
21. Ingersoll LR, Plass HJ. 1948. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. Heating Piping & Air Conditioning. 119-22.
22. Mostafa H. Sharqawy "et al". 2009. First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia. Renewable Energy. 2218-2223 p.
23. Ignacio Zuloaga F., Javier Sierra G. Agosto 2009. Obras Urbanas. Climatización de nave industrial mediante un sistema de captación geotérmica vertical. 79p.
24. NCh 853. Of1991. "Acondicionamiento térmico – Envoltente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas" Instituto Nacional de Normalización. 23-24 P.
25. Pilotes Terratestt. Socializado entibación edificio PBBP. Presupuesto comparativo pilas. 26/05/2009.
26. Econo-heat-Chile. Enero 2010. Cuadro comparativo de consumo. URL accesado 10/09/2011:
<http://www.econo-heat-chile.cl/comparativo.htm>