

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ENERGÍA,
USANDO EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS, TOMANDO EN
CUENTA LA EFICIENCIA DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL Y
TRANSFERENCIA DE CALOR PARA DIFERENTES TIPOS DE
CONFIGURACIONES DE PILOTES DE ENERGÍA.”**

Realizado por:

WILLIAMS SEQUERA, JESÚS MANUEL

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de:**

INGENIERO CIVIL

Barcelona, Agosto 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ENERGÍA,
USANDO EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS, TOMANDO EN
CUENTA LA EFICIENCIA DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL Y
TRANSFERENCIA DE CALOR PARA DIFERENTES TIPOS DE
CONFIGURACIONES DE PILOTES DE ENERGÍA”**

Realizado por:

Williams S., Jesús M.

Asesor:

Prof. Juan Félix Díaz

Barcelona, Agosto 2009.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ENERGÍA,
USANDO EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS, TOMANDO EN
CUENTA LA EFICIENCIA DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL Y
TRANSFERENCIA DE CALOR PARA DIFERENTES TIPOS DE
CONFIGURACIONES DE PILOTES DE ENERGÍA”**

El Jurado hace constar que asignó a esta tesis la clasificación de:

Prof. Juan Félix Díaz
Asesor Académico

Jurado:

Prof. Gerónimo Velásquez
Jurado Principal

Prof. Edmundo Ruiz
Jurado Principal

Barcelona, Agosto 2009.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de Trabajos de Grado:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD, Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS PARA OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIÉN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto representa el primer paso para el desarrollo de una innovadora tecnología ambientalista en Venezuela, por lo cual debo dar un gran agradecimiento a todas las personas que hicieron que esta tesis fuera posible, pero no obstante teniendo la esperanza de que alguien continúe desarrollando este proyecto hasta lograr ver en cualquier parte de Venezuela algún tipo de edificación utilizando los pilotes de energía.

Una persona a la que le debo una amplia gratitud es mi primo José Acuña el cual abrió las puertas de una universidad ejemplar como KTH y me ayudo a desarrollar este proyecto desde meses antes de su inicio hasta su favorable presentación. Junto a mis asesores académicos, en el departamento de energía (KTH) el profesor Björn Palm y en el departamento de Ingeniera Civil (UDO) el Profesor Juan Félix Díaz los cuales me prestaron una excelente asesoría.

También me gustaría agradecer de una forma muy especial, a mis padres Myriam y Luis, mis hermanos Ana, Luis y Patricia, y resto de mis familiares por su fuerte apoyo incondicional a lo largo de la realización de este proyecto, y con el mismo cariño a todos mis amigos que siempre me ayudaron alcanzar mis metas. Muchas gracias a todos.

Jesús Williams.

RESUMEN

Un sistema de pilotes de energía proviene de la combinación de dos principios, uno los pilotes como fundaciones profundas y dos los pozos intercambiadores de calor BHE (Borehole heat exchanger), este sistema tiene como función el aprovechamiento de la energía geotérmica proveniente de un estrato profundo. También provee una forma fácil de instalar los BHE y reduce los elevados costos de perforar pozos dentro del suelo. El desempeño de intercambiar energía térmica con el suelo en los pilotes de energía depende del arreglo de tuberías, el cual será estudiado con los modelos existentes y las mejoras que se hagan a conveniencia. La esencia de esta investigación es chequear la factibilidad del aprovechamiento de la energía geotérmica mediante el sistema de pilotes de energía desde el punto de vista térmico y estructural. Con respecto a la evaluación del comportamiento de los pilotes de energía, este proyecto se enfoca en simular cada modelo térmico en un software llamado COMSOL Multiphysics, utilizando diferentes módulos, teniendo como finalidad conocer cual arreglo obtiene un mejor desempeño térmico. La ventaja de este programa es que presta la posibilidad de simular un mismo modelo para varios fenómenos, lo cual aproxima los resultados a la realidad. La perspectiva estructural dentro de la investigación es verificar cómo se ve afectada la resistencia del pilote (capacidad de carga y deformación axial) al añadir las tuberías. Para ello es necesario el uso del programa SAP 2000, que permite conocer que tanto se deforma un pilote de energía comparado con pilote convencional bajo las mismas condiciones. Este sistema de pilotes de energía es aplicable a cualquier tipo de edificaciones que requiera el uso de fundaciones profundas y tengan demanda de energía térmica.

ÍNDICE

| | |
|---|-------------|
| RESOLUCIÓN | IV |
| AGRADECIMIENTO | V |
| RESUMEN | VI |
| ÍNDICE | VII |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| LISTA DE TABLAS | XVII |
| CAPITULO I | 19 |
| INTRODUCCIÓN | 19 |
| 1.1 Planteamiento del problema | 21 |
| 1.2 Objetivos..... | 23 |
| 1.2.1 Objetivo principal..... | 23 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 23 |
| CAPITULO II | 25 |
| MARCO TEÓRICO | 25 |
| 2.1 Pilotes como fundación profunda | 25 |
| 2.1.1 Capacidades de carga..... | 26 |
| 2.2 Pozos intercambiadores de calor | 29 |
| 2.3 Pilotes de energía..... | 32 |
| 2.4 COMSOL Multiphysics..... | 37 |
| 2.4.1 Módulo Incompresible Navier-Stokes..... | 39 |
| 2.4.2 Módulo de convección y conducción | 40 |
| 2.5 Software SAP2000 v11 | 41 |
| 2.6 Ensamblaje de los pilotes de energía..... | 43 |
| CAPITULO III | 46 |
| MARCO METODOLÓGICO | 46 |
| 3.1 Metodología..... | 46 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.1 Estudio de la literatura | 46 |
| 3.1.2 Simulaciones con COMSOL Multiphysics | 46 |
| 3.1.3 Simulaciones con SAP2000 v11..... | 47 |
| 3.1.4 Generación de geometría y modelos | 47 |
| 3.1.5 Análisis de resultados | 47 |
| 3.2 Análisis térmico..... | 47 |
| 3.2.1 Modelado Longitudinal | 48 |
| 3.2.1.1 Análisis estacionario..... | 51 |
| 3.2.1.2 Resultado del análisis transitorio..... | 62 |
| 3.2.2 Modelado de secciones transversales | 74 |
| 3.2.2.1 Condiciones de borde | 75 |
| 3.2.2.2 Condiciones iniciales..... | 76 |
| 3.2.2.3 Ajustes de malla..... | 77 |
| 3.2.2.4 Condiciones de tiempo | 77 |
| 3.2.2.5 Resultados de las secciones transversales | 78 |
| 3.2.3 Modelados y resultado de secciones transversales en grupo | 86 |
| 3.2.3.1 Geometría y arreglos de malla..... | 86 |
| 3.2.3.2 Resultados..... | 87 |
| 3.5 Análisis estructural | 90 |
| 3.5.1 Capacidad estática del pilote | 90 |
| 3.5.1.1 Resultados..... | 92 |
| 3.5.2 Modelos estructurales de los pilotes de energía | 98 |
| 3.5.2.1 Diseño de los pilotes convencionales | 98 |
| 3.5.2.3 Resultados..... | 108 |
| CONCLUSIONES..... | 114 |
| RECOMENDACIONES..... | 117 |
| 5.1 Apéndice térmico..... | 118 |

| | |
|---|------------|
| 5.1.1 Comparación de temperaturas de canales de agua para los pilotes de energía con forma de U (tubos cercanos unos a otros) | 118 |
| 5.1.2 Perfil de temperatura para el periodo de trayectoria del agua | 120 |
| 5.2 Apéndice estructural | 121 |
| 5.2.1. Nomenclatura de la Ecuación 3 para la capacidad última debido al trabajo de punta | 121 |
| 5.2.2 Tablas de origen para gráficas de barras de porcentaje de reducción de la capacidad de carga Vs Pilote de energía | 122 |
| 5.2.3 Tablas de origen para gráficas de porcentaje de reducción de la capacidad de carga Vs diámetro del pilote..... | 125 |
| 5.2.4 Tablas de origen para las gráficas de deformación axial para los diferentes tipos de pilotes de energía | 126 |
| BIBLIOGRAFÍA CITADA..... | 127 |
| BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL | 130 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. (a) trabajo por punta; (b) Pilotes a cohesión; (c) Pilotes a fricción (d) Pilotes a fricción y cohesión [1]..... | 22 |
| Figura 2.2 Pozo intercambiador de calor [3]..... | 26 |
| Figura 2.3. Profundidad Vs temperatura [5]..... | 27 |
| Figura 2.4. Ensamblaje de un pilote de energía [7]..... | 29 |
| Figura 2.5. Cuatro tipos de arreglos de pilotes de energía [8]..... | 30 |
| Figura 2.6. Arreglos presentados por Ooka et al [9]..... | 32 |
| Figura 2.7. Arreglos presentados por Katsura et al [10]..... | 33 |
| Figura 2.8. Rata de extracción de calor con respecto al flujo [10]..... | 33 |
| Figura 2.9. Línea de trabajo de COMSOL [12]..... | 35 |
| Figura 2.10. Muestra de tuberías utilizadas en los pilotes de energía y BHE [16]..... | 40 |
| Figura 3.1. Planos de los pilotes de energía en tres dimensiones; Forma de U (Izquierda); Forma de W (Derecha). Modelo principal (a); Tope (b); Fondo (c)..... | 50 |
| Figura 3.2. Planos de los pilotes de energía con forma Coaxial en tres dimensiones; modelo principal (a); Tope (b); Fondo (c). | 50 |
| Figura 3.3. Sección transversal y detalle de tuberías para los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial (unidades en mm). | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.4. Malla para el módulo de Navier-Stokes para los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial | 54 |
| Figura 3.5. Malla para el módulo de convección y conducción para los modelos de forma de U, W y Coaxial, respectivamente | 55 |
| Figura 3.6. Resultados del campo de velocidad calculado con el módulo de Navier-Stokes para los pilotes de energía con forma de U(a), W (b) y Coaxial(c)..... | 56 |
| Figura 3.7. Resultado del pilote de energía de forma de U (°C)..... | 58 |
| Figura 3.8. Resultado del pilote de energía de forma de W (°C)..... | 59 |
| Figura 3.9. Resultado del pilote de energía de forma de Coaxial (°C). | 60 |
| Figura 3.10. Resultados transitorios de los modelos con forma de U y W (°C) | 63 |
| Figura 3.11. Resultados transitorios de los modelos con forma Coaxial (°C). | 64 |
| Figura 3.12. Profundidad Vs la temperatura para el pilote de energía con forma de U. | 65 |
| Figura 3.13. Profundidad Vs la temperatura para el pilote de energía con forma de W. | 65 |
| Figura 3.14. Profundidad Vs la temperatura para el pilote de energía con forma Coaxial. | 66 |
| Figura 3.15. Comparación de las temperaturas para los tres casos de pilotes de energía. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.16. Comparación de la separación de canales de agua para el pilote de energía con forma de U. | 69 |
| Figura 3.17. Comparación de temperaturas con diferentes periodos de tiempo para el pilote de energía con forma de U. | 70 |
| Figura 3.18. Temperatura vs tiempo para el pilote de energía con forma de U. | 72 |
| Figura 3.19. Temperatura vs tiempo para el pilote de energía con forma de W. | 72 |
| Figura 3.20. Temperatura vs tiempo para el pilote de energía con forma de Coaxial. | 73 |
| Figura 3.21. Ajuste de malla para el tipo U. | 77 |
| Figura 3.22. Ajuste de malla para el tipo W. | 77 |
| Figura 3.23. Ajuste de malla para el tipo Coaxial. | 77 |
| Figura 3.24. Resultado para el de forma de U. | 78 |
| Figura 3.25. Resultado para el de forma de W. | 78 |
| Figura 3.26. Resultado para el de forma de Coaxial. | 78 |
| Figura 3.27. Barra de escala para los pilotes tipo U y W en °C. | 78 |
| Figura 3.28. Barra de escala para los pilotes de energía tipo Coaxial en °C. | 79 |
| Figura 3.29. Detalle del resultado para el de forma de U. | 79 |
| Figura 3.30. Detalle del resultado para el de forma de W. | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.31. Detalle del resultado para el de forma de Coaxial..... | 79 |
| Figura 3.32. Temperatura contra longitud para el pilote de energía tipo U..... | 80 |
| Figura 3.33. Temperatura contra longitud para el pilote de energía tipo W. | 81 |
| Figura 3.34. Temperatura contra longitud para el pilote de energía tipo Coaxial. | 81 |
| Figura 3.35. Resistencia térmica..... | 84 |
| Figura 3.36. Geometría del modelo pilotes de energía en grupo..... | 87 |
| Figura 3.37. Malla del modelo pilotes de energía en grupo..... | 87 |
| Figura 3.38. Resultado de la extracción de calor con pilotes de energía arreglado en grupo (°C). | 88 |
| Figura 3.39. Resultado de la Inyección de calor con pilotes de energía arreglado en grupo (°C). | 88 |
| Figura 3.40. Perfil de temperatura del suelo durante el calentamiento..... | 89 |
| Figura 3.41. Perfil de temperatura del suelo durante el enfriamiento..... | 89 |
| Figura 3.42. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 0.4 m de diámetro..... | 92 |
| Figura 3.43. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 0.6 m de diámetro..... | 93 |
| Figura 3.44. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 0.8 m de diámetro..... | 93 |
| Figura 3.45. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 1.0 m de diámetro..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.46. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 1.2 m de diámetro..... | 94 |
| Figura 3.47. Tendencia de la reducción de carga para el pilote de energía tipo U | 96 |
| Figura 3.48. Tendencia de la reducción de carga para el pilote de energía tipo W | 96 |
| Figura 3.49. Tendencia de la reducción de carga para el pilote de energía tipo Coaxial | 97 |
| Figura 3.50. Ejemplo de modelo en el programa Sap2000 | 101 |
| Figura 3.51. Pilote de energía tipo U de 0,4 m de diámetro | 102 |
| Figura 3.52. Pilote de energía tipo U de 0,6 m de diámetro | 102 |
| Figura 3.53. Pilote de energía tipo U de 0,8 m de diámetro | 103 |
| Figura 3.54. Pilote de energía tipo U de 1,0 m de diámetro | 103 |
| Figura 3.55. Pilote de energía tipo U de 1,2 m de diámetro | 103 |
| Figura 3.56. Pilote de energía tipo W de 0,4 m de diámetro..... | 104 |
| Figura 3.57. Pilote de energía tipo W de 0,6 m de diámetro..... | 104 |
| Figura 3.58. Pilote de energía tipo W de 0,8 m de diámetro..... | 105 |
| Figura 3.59. Pilote de energía tipo W de 1,0 m de diámetro..... | 105 |
| Figura 3.60. Pilote de energía tipo W de 1,2 m de diámetro..... | 105 |
| Figura 3.61. Pilote de energía tipo Coaxial de 0,4 m de diámetro..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.62. Pilote de energía tipo Coaxial de 0,6 m de diámetro | 106 |
| Figura 3.63. Pilote de energía tipo Coaxial de 0,8 m de diámetro | 107 |
| Figura 3.64. Pilote de energía tipo Coaxial de 1,0 m de diámetro | 107 |
| Figura 3.65. Pilote de energía tipo Coaxial de 1,2 m de diámetro | 108 |
| Figura 3.66. Deformación axial para los pilotes de 0,4 m de diámetro. | 109 |
| Figura 3.67. Deformación axial para los pilotes de 0,6 m de diámetro | 109 |
| Figura 3.68. Deformación axial para los pilotes de 0,8 m de diámetro | 110 |
| Figura 3.69. Deformación axial para los pilotes de 1,0 m de diámetro | 110 |
| Figura 3.70. Deformación axial para los pilotes de 1,2 m de diámetro | 111 |
| Figura 3.71. Tendencia de los pilotes según su deformación axial..... | 112 |
| Figura 5.1. Dimensiones del pilote con tuberías cercanas..... | 109 |
| Figura 5.2. Resultados en tres dimensiones del pilote de energía con forma de U (tubos cercanos unos a otros) en °C..... | 109 |
| Figura 5.3. Temperatura contra profundidad para pilote de energía con forma de U (tubos cercanos unos a otros)..... | 110 |
| Figura 5.4. Resultado del perfil de temperatura (°C) para el pilote de energía en tres dimensiones (a); detalle del tope (b); detalle del fondo (c), para un periodo de tiempo de 251 seg..... | 111 |

Figura 5.5. Profundidad contra Temperatura para pilote de energía para un periodo de tiempo de 251 seg.....111

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Desempeño de pilotes de energía [8]..... | 31 |
| Tabla 3.1. Propiedades Térmicas [17]..... | 48 |
| Tabla 3.2. Subdominios para el módulo de Navier-Stokes..... | 52 |
| Tabla 3.3. Subdominios para el módulo de Convección y conducción | 52 |
| Tabla 3.4. Condiciones de borde para Navier-Stokes..... | 53 |
| Tabla 3.5. Condiciones de borde para la Convección y conducción | 53 |
| Tabla 3.6. Ajustes de malla para el módulo de convección y conducción..... | 54 |
| Tabla 3.7. Resumen de los resultados del análisis estacionario debido a la extracción de energía por metro..... | 61 |
| Tabla 3.8. Condiciones de borde para los pilotes de energía con forma de U..... | 75 |
| Tabla 3.9. Condiciones de borde para los pilotes de energía con forma de W..... | 75 |
| Tabla 3.10. Condiciones de borde para los pilotes de energía con forma de Coaxial..... | 76 |
| Tabla 3.11. Muestra de valores iniciales para los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial..... | 76 |
| Tabla 3.12. Comparación de temperatura entre modelos..... | 82 |
| Tabla 3.13 Datos térmicos del pilote de energía con forma de U..... | 84 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.14. Datos térmicos del pilote de energía con forma de W..... | 84 |
| Tabla 3.15. Datos térmicos del pilote de energía con forma de Coaxial..... | 85 |
| Tabla 3.16. Propiedades de la sección transversal..... | 99 |
| Tabla 3.17. Cargas utilizadas en cada modelo..... | 100 |
| Tabla 5.2. Para el pilote de 0.6 m de diámetro..... | 113 |
| Tabla 5.3. Para el pilote de 0.8 m de diámetro..... | 114 |
| Tabla 5.4. Para el pilote de 1.0 m de diámetro..... | 114 |
| Tabla 5.5. Para el pilote de 1.2 m de diámetro..... | 115 |
| Tabla 5.6. Datos de origen para la tendencia de reducción de carga correspondiente al pilote de energía tipo U..... | 115 |
| Tabla 5.7. Datos de origen para la tendencia de reducción de carga correspondiente al pilote de energía tipo W..... | 116 |
| Tabla 5.8. Datos de origen para la tendencia de reducción de carga correspondiente al pilote de energía tipo Coaxial..... | 116 |
| Tabla 5.9. Datos de origen para las gráficas correspondientes a la deformación axial..... | 117 |

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Los pilotes de energía son una tecnología nueva que brinda un paso más adelante en el uso de una energía renovable y que se basa en la fusión de dos principios: pilotes como fundación profunda y pozos intercambiadores de calor, la cual permite utilizar a la profundidad de la fundación como pozo para el dispositivo de intercambio de calor. Esta tecnología atrae la atención por varias razones: reduce la necesidad primaria de fuentes de energía que emiten CO₂, por lo cual representa una energía amigable para el ambiente, también reduce el costo de inversión del sistema BHE que es relativamente alto debido a la perforación de pozos. Además, reduce el tiempo total de construcción al ser eliminada la perforación adicional de pozos. Los pilotes de energía pueden ser utilizados en cualquier tipo de edificación que requiera fundaciones pilotes como profundas y tenga una demanda de energía térmica.

Los pilotes son la parte de la estructura la cual soporta todas las cargas del edificio y las distribuye en el suelo, este es usado cuando el suelo directamente por debajo del edificio no es capaz de soportar las cargas de la estructura. El tipo de pilote es seleccionado dependiendo de diferentes características del suelo y de acuerdo a la magnitud de las cargas provenientes de la súper estructura.

Los pozos intercambiadores de calor, como mencionan sus siglas en ingles BHE (Borehole Heat Exchanger) es un dispositivo usado para extraer o inyectar energía térmica dentro del suelo. Básicamente están formados por un par de tubos unidos (en forma de U), uno de ellos proporciona la entrada al fluido y el otro la salida del mismo. Este fluido lleva la energía que va a ser intercambiada por medio de cambios de temperatura con el suelo durante su trayectoria, y luego dicha energía es

entregada a un sistema de bomba de calor; el cual aumenta esta energía para luego ser dispersada en todo el edificio con propósitos de enfriamiento o calentamiento.

Al tener instalado un sistema de pilotes de energía en cualquier tipo de edificación es posible suprimir el uso de sistemas adicionales de enfriamiento o calentamiento como: aires acondicionados, calentador de agua, sistema de calefacción, etc. En el mundo existen países que actualmente están utilizando dicha tecnología. Uno de los casos de mayor envergadura es el existente en Suiza, en el aeropuerto de Zúrich, en el cual todo su sistema de refrigeración es basado en el uso de pilotes de energía.

1.1 Planteamiento del problema

El impacto ambiental del planeta está estrechamente relacionado con un problema social surgido por la utilización creciente del petróleo. Por tal razón, la comunidad internacional apoya grandes proyectos desarrollados en muchas universidades, que han decidido tomar acciones relevantes para mitigar los efectos de la contaminación global a través de diferentes energías alternativas como la geotérmica, eólica, hidráulica, solar entre otras.

En vista de lo mencionado anteriormente, este proyecto estudia el uso de la energía geotérmica por medio de pilotes de energía. Esta tecnología atrae la atención debido a que: reduce la necesidad primaria de fuentes de energía que emiten CO₂, la cual representa una energía amigable para el ambiente y es cien por ciento renovable. Además al no ser necesario el uso de la tecnología de pozos intercambiadores de calor, se eliminan los costos de inversión que son relativamente altos debido a la perforación de pozos y la pérdida de tiempo relacionada al proceso.

El sistema de pilotes de energía puede ser utilizado en cualquier tipo de edificación que requiera fundaciones profundas y que tenga una demanda de energía térmica.

En el campo de pilotes de energía existen diferentes tipos, pero siempre manteniendo los mismos principios. En estos momentos existen pocos países trabajando en el campo de los pilotes de energía, debido a que los mismos llevan pocos años siendo aplicados, esto amerita demostrar algunos ejemplos de los pilotes de energía que han sido usados en otros.

Para desarrollar este proyecto se revisarán referencias del más alto nivel conseguidas en este tipo de tecnología (pilotes de energía), que han sido probados y

fabricados en institutos tecnológicos, universidades y hasta en la industria en diferentes países, con el fin de escoger qué tipos de pilotes de energía van a ser evaluados y comparados con respecto a su transferencia de calor y el comportamiento estructural.

Una vez definidos los parámetros de evaluación, estos serán introducidos en forma de modelos en un software de elementos finitos llamado COMSOL Multiphysics, el cual simula diferentes tipos de fenómenos para un mismo modelo, permitiendo un rango de comparación entre ellos. Finalmente los resultados serán validados al compararlos con los proyectos previos estudiados y con valores obtenidos del cálculo tradicional de los pilotes.

Se estima que este proyecto será el primer paso para el desarrollo de la tecnología de pilotes de energía dentro de la comunidad de la Universidad de Oriente y que logre incentivar la curiosidad para el uso de energías renovables dentro de los diseños de nuevas edificaciones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Evaluar el comportamiento de los pilotes de energía, usando el software COMSOL Multiphysics, tomando en cuenta la eficiencia de la resistencia estructural y transferencia de calor para diferentes tipos de configuraciones de pilotes de energía.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Describir el estado del arte de los sistemas de pilotes de energía.
2. Definir diferentes arreglos de pilotes de energía con respecto a la transferencia de calor y el comportamiento estructural.
3. Simular diferentes modelos de pilotes de energía desde el punto de vista de transferencia de calor, bajo las mismas condiciones térmicas; usando el programa COMSOL Multiphysics.
4. Simular los modelos seleccionados desde el punto de vista estructural, de acuerdo con los tipos de suelo y carga más comunes.
5. Validar los modelos de COMSOL Multiphysics con data de proveniente del fundamento teórico

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Pilotes como fundación profunda

El pilote es la parte de la estructura la cual soporta todas las cargas del edificio y las distribuye en el suelo; esto es usado cuando el suelo directamente por debajo del edificio no es capaz de soportar las cargas de la estructura. Estas fundaciones alcanzan profundidades de entre 10 y 50 m. Existen diferentes tipos de materiales usados para construcción de pilotes; tales como: madera, concreto, acero o una combinación de estas [1]. El tipo de pilote es seleccionado dependiendo de diferentes características del suelo y de acuerdo a la magnitud de cargas provenientes de la súper estructura.

La capacidad de un pilote puede ser evaluada por su resistencia estructural y por la capacidad de carga del suelo. Las cargas provenientes del pilote pueden ser transmitidas al suelo adyacente por fricción, adherencia, trabajo de punta o por la combinación entre estas. Más adelante será explicado el cálculo numérico para determinar estos valores.

Existen diferentes tipos de pilotes de concreto en la industria de la construcción y estos se pueden clasificar de forma general en dos grupos de acuerdo a la transmisión de cargas: por punta, fricción o una combinación de ambas [1].

La primera (trabajo por punta) transmite las cargas directamente en el suelo firme localizado en un estrato profundo, haciendo que el pilote se comporte como una típica columna. Sin embargo, el pilote también trabaja por fricción con el suelo, La resistencia total de carga es la suma del soporte que provee la fricción más el trabajo

por punta generado por el apoyo en la capa profunda. Esto es ilustrado en la figura 2.1(a). Los siguientes casos son llevados por los principios de la cohesión y la fricción que existe entre el pilote y el suelo. Generalmente, la cohesión se genera cuando hay más de un pilote incado en el mismo lugar, así el suelo obtiene una mayor densidad y disminuye su porosidad, debido a esto, se reduce la compresibilidad del suelo que rodea al grupo de pilotes, esto se ilustra en la figura 2.1 (b). En el caso de los pilotes de fricción conocidos también como pilotes flotantes (ver figura 2.1(c)), la resistencia a la carga es solo proporcionada por la fricción entre el suelo y el pilote. Sin embargo ambos métodos pueden ser aplicados y la resistencia final es la alcanzada por la suma de cada uno de ellos, como se ilustra en la Figura 2.1 (d).

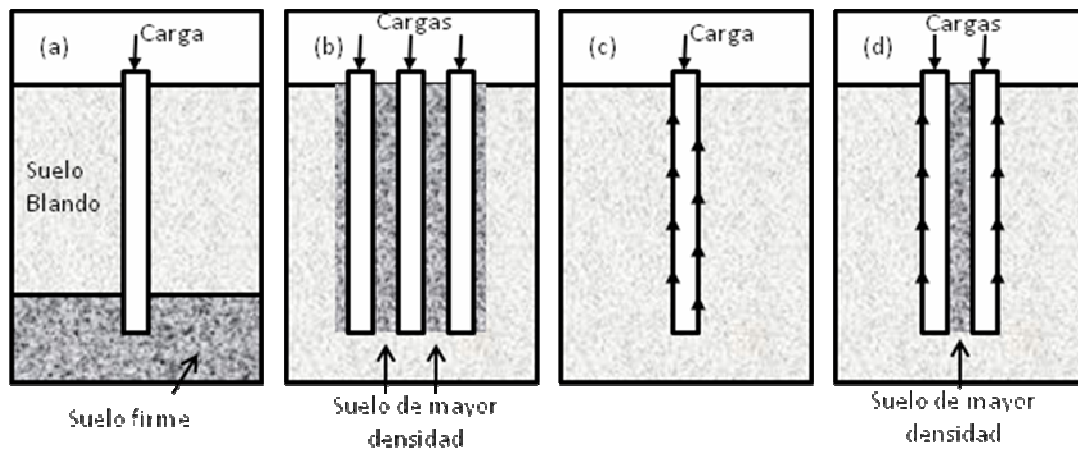


Figura 2.1. (a) Trabajo por punta; (b) Pilotes a cohesión; (c) Pilote a fricción, (d) Pilotes a fricción y cohesión [1]

Los pilotes pueden ser instalados usando dos métodos principales, hincados o colocados in situ. Los pilotes hincados en el suelo deben ser prefabricados, los cuales pueden ser colocados de diferente forma. Primero, usando un martillo desde 1.5 a 4 toneladas, golpeando directamente el pilote hasta alcanzar la profundidad requerida y el segundo método es enroscando el pilote en el suelo con un mandril de acero.

En la instalación in situ, una de las posibilidades es colocar una camisa dentro del suelo hasta alcanzar la profundidad requerida. Esta camisa puede ser recuperable o perdida. Seguidamente todo este suelo dentro de dicha camisa es removido para luego colocar el refuerzo de acero y el concreto. Sin embargo otra posible opción es colocar lodo bentonítico para mantener la estabilidad del suelo en lugar de la camisa.

Otra forma de colocar los pilotes es cuando el suelo es lo suficientemente firme y no es necesario el uso de la camisa ni lodo bentonítico, tan solo se excava o perfora la cantidad de suelo requerido para posteriormente colocar el refuerzo y el concreto.

2.1.1 Capacidades de carga

El método utilizado para calcular la capacidad de carga de los pilotes depende de la forma en que se transmiten las solicitaciones al suelo y de si el pilote trabaja a compresión o a tensión. A continuación se muestran la Ecuación 1 y la Ecuación 2 para compresión y tensión, respectivamente [2].

$$P_u = P_{pu} + \sum P_{si} \quad \text{Ec. 1}$$

$$T_u = \sum P_{si} + W \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: P_u = Capacidad ultima (máxima) de compresión del pilote.

T_u = Capacidad ultima de tensión del pilote.

P_{pu} = Capacidad ultima debido al trabajo por punta; Puede ser despreciable en “pilotes flotantes”.

$\sum P_{si}$ = Resistencia de piel, causado por diferentes tipos de estratos; puede ser despreciable cuando el pilote solo trabaje por punta.

W = Peso del pilote.

De acuerdo al enfoque de este proyecto, solo se trabajará con la ecuación de compresión, la cual necesita ser dividida por el factor de seguridad (FS.), comúnmente dentro del rango de 2 a 4 o más, dependiendo de la poca certeza del diseñador.

Para el modelado de los pilotes de energía es necesario revisar donde los puntos de contacto entre las tuberías y la fundación afectan la capacidad de carga, lo cual se analizan con la Ecuación 3 y la Ecuación 4.

La capacidad ultima debido al trabajo por punta, depende del soporte que provee el estrato profundo de suelo firme, la cual se obtiene por la Ecuación 3 expresada por Bowles [2].

$$P_{pu} = A_p [cN'_c + n\bar{q}(N'_q - 1)] \quad \text{Ec. 3.}$$

El detalle de la nomenclatura usada en la Ecuación 3 se menciona en el apéndice estructural, donde el único factor que no depende de las características del suelo es el área del pilote (A_p), dejando los otros términos de la ecuación como constantes para la comparación entre los pilotes de energía y los pilotes típicos, dando un punto de análisis debido a la reducción de la sección transversal del pilote al añadir las tuberías que trabajaran como intercambiadores de calor dentro de la fundación.

La Ecuación 4 que dicta resistencia por fricción según Bowles [2]:

$$P_s = \sum A_s F_s \quad \text{Ec. 4.}$$

El detalle de la nomenclatura usada en la Ecuación 4 se menciona en el apéndice estructural.

Donde la ecuación representa la suma de resistencia debido a la fricción de acuerdo a cada estrato del suelo, A_s es el área efectiva de superficie del pilote que se encuentra en contacto con el suelo (m^2), computada como el perímetro del pilote por la profundidad, y F_s es la resistencia de fricción que se calcula usando los métodos de α , λ o β (KPa).

Los métodos de α , λ y β son directamente dependientes de las propiedades del suelo, y el valor de A_s es debido al área externa del pilote, por ello la capacidad de resistencia por fricción no varía por la adición de tuberías como intercambiadores de calor dentro de los pilotes. Por lo tanto cuando comparamos los pilotes con los pilotes de energía, el valor de la capacidad debido a la fricción se mantiene constante.

Generalizando en el cálculo de capacidad última de carga por compresión P_u , es posible apreciar que hay más de un factor que se considera constante, y el cambio solo se produce en una porción de la ecuación generada por el trabajo de punta P_{pu} . Reescribiendo la Ecuación 1 y tomando los valores como constantes se encuentra la Ecuación 5 que se muestra a continuación:

$$P_u = Ap(A) + B \quad \text{Ec. 5.}$$

Donde: $A = cN'c + \bar{n}\bar{q}(N'q - 1)$

$$B = \sum A_s F_s$$

$$Pa = \frac{P_u}{SF} \quad \text{Ec. 6.}$$

Para obtener la capacidad de carga admisible mostrada en la Ecuación 6, se divide el Pu resultante de la Ecuación 5 entre el factor de seguridad. El estudio hecho en función de estas ecuaciones será mostrado en la sección 3.5.1 referente al análisis estructural

2.2 Pozos intercambiadores de calor

Los pozos intercambiadores de calor (BHE) son dispositivos usados para extraer o inyectar energía térmica dentro del suelo, básicamente formado por un par de tubos unidos (en forma de U), uno de ellos proporciona la entrada al fluido y el otro la salida del mismo. Este fluido lleva la energía que va a ser intercambiada (por medio de cambios de temperatura) con el suelo durante su trayectoria, y luego será entregada a un sistema de bomba de calor; donde se aumenta la cantidad para luego ser dispersada en todo el edificio con propósitos de enfriamiento o calentamiento.

Para instalar un sistema de intercambiadores de calor es necesario perforar un pozo vertical dentro del suelo que luego se le colocará el sistema de BHE mencionado anteriormente.

La figura 2.2 ilustra un sistema típico de pozos intercambiadores de calor. Se muestra el recorrido del fluido desde la entrada con el color azul lo que significa que el fluido aun se mantiene con una baja temperatura, luego este incrementa su temperatura representado por el cambio lento de color hasta que se torna completamente rojo, significando que el fluido ha absorbido la energía

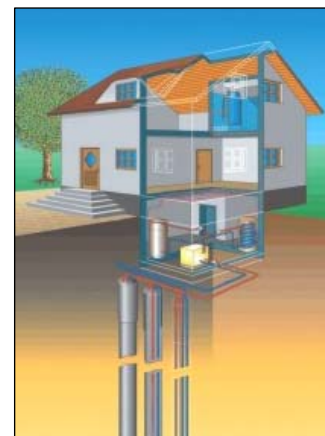


Figura 2.2. Pozo intercambiador de calor [3].

térmica del suelo y que se encuentra disponible para ser entregada al sistema de bombas de calor.

De acuerdo a Eskilsson [4] el suelo tiene la propiedad de mantener una temperatura casi constante luego de pocos metros de profundidad. Como se muestra en la figura 2.3 brindada por el estudio hecho en Estocolmo, Suecia por Acuña [5]. La temperatura es constante a lo largo del año y la temperatura de la superficie del suelo varía ligeramente, sin embargo esto es despreciable debido a que las profundidades normales de los sistemas de BHE están alrededor de los 100 metros.

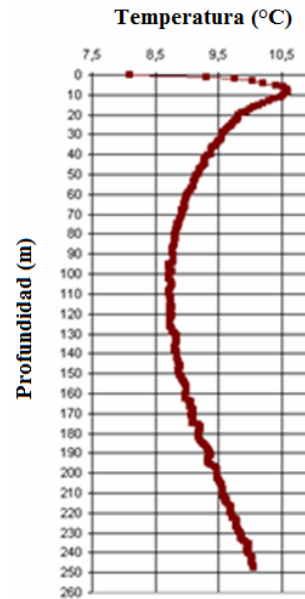


Figura 2.3. Profundidad vs temperatura [5].

Existen diferentes tipos de pozos intercambiadores de calor; todos mantienen las mismas características, sin embargo existe la posibilidad de cambiar el arreglo de las tuberías o sus dimensiones con la finalidad de hacer más eficiente el proceso. En el capítulo sobre pilotes de energía se describen varios arreglos con el objetivo de alcanzar un sistema con un desempeño eficiente.

Según Hellström [6] que un buen parámetro de evaluación del desempeño térmico de un BHE es la resistencia térmica fluido-suelo. Esto caracteriza el proceso térmico entre el calor llevado por el fluido y el suelo adyacente al pozo. Este proceso depende de las propiedades térmicas del suelo y la distancia mostrada en el arreglo específico en el sistema de pozos intercambiadores de calor.

La transferencia de calor entre el fluido y el suelo envuelve varios procesos tales como: el fenómeno de transferencia de calor por convección en el punto de contacto agua-tubo, y el fenómeno de conducción a través de la pared del tubo. Asumiendo que la capacidad de calor de un material entre el fluido y el suelo es pequeña, tal que el efecto de capacidad de calor de esta parte es despreciable [6], esto se puede expresar en la Ecuación 7 como resistencia térmica fluido-suelo.

$$T_f - T_b = q.R_b \quad \text{Ec. 7.}$$

Donde: $T_f - T_b$ = Diferencia de temperatura entre el fluido y suelo inmediato, respectivamente (°C).

q = Relación entre la rata de inyección/extracción por la longitud activa del pozo (W/m).

R_b = Resistencia térmica fluido-suelo (°C/w/m).

Para calcular la resistencia térmica es necesario tener el valor de energía absorbida o disipada por el fluido entre dos puntos de medida de temperatura y se computa de la siguiente manera en la Ecuación 8 [6].

$$q = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot Cp \cdot \Delta T}{L} \quad \text{Ec. 8.}$$

Donde: \dot{V} =Flujo volumétrico (m³/s)

ρ = Densidad (Kg/m³)

C_p = Calor específico (J/Kg.°C)

ΔT = Diferencia de temperatura (°C)

L = Longitud total de intercambio de calor (m)

2.3 Pilotes de energía

Los pilotes de energía son el resultado de la fusión de dos principios: pilotes como fundación profunda y pozos intercambiadores de calor, donde la profundidad de la fundación sustituye al pozo del dispositivo BHE.

En la figura 2.4, se ilustra un ejemplo de ensamblado de pilote de energía. La figura 2.4(a) muestra un pilote simple con su refuerzo, la figura 2.4 (b) expone un sistema de intercambiadores de calor con una tubería central aislada térmicamente que funciona como la entrada de fluido y alrededor de ella un grupo de tubos que hacen el trabajo de la interacción térmica, al final del recorrido ellos prestan la salida del fluido. En la figura 2.4(c) es posible apreciar ambos sistemas combinados formando un pilote de energía.

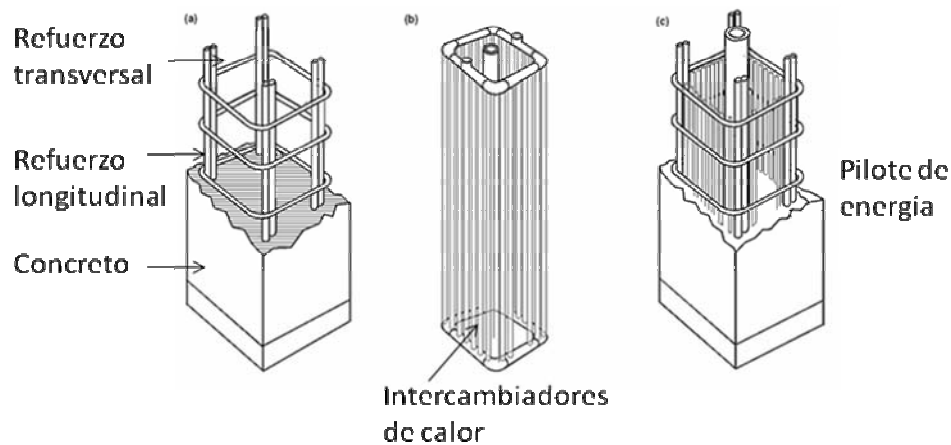


Figura 2.4. Ensamblaje de un pilote de energía [7].

Esta tecnología atrae tanto la atención por varias razones: reduce la necesidad primaria de fuentes de energía que emiten CO₂, el cual representa una energía amigable para el ambiente. También reduce el tiempo y el costo de inversión del sistema BHE que es relativamente alto debido a la perforación de pozos.

Los pilotes de energía pueden ser utilizados en cualquier tipo de edificación que requiera fundaciones profundas y que tengan una demanda de energía térmica.

En el campo de los pilotes de energía existen diferentes tipos pero siempre manteniendo los mismos principios. En estos momentos existen pocos países desarrollando estas tecnologías y amerita demostrar los ejemplos de pilotes de energía que han sido usados y los tipos más frecuentes de acuerdo a cada país.

Los siguientes cuatro tipos de pilotes de energía fueron desarrollados y presentados en Shanghái, China por Gao et al [8] durante un periodo de cinco meses, ellos utilizaron pilotes de 600 mm de diámetro y de longitudes de 25 m, cada uno tenía un arreglo diferente de tuberías. Es posible apreciar en la figura 2.5 los pilotes de energía con forma de W, única U, doble U y la triple U. Estos ejemplos también muestran una flecha roja que representan la entrada del fluido a una alta temperatura y una flecha negra con la salida del fluido a menor temperatura.

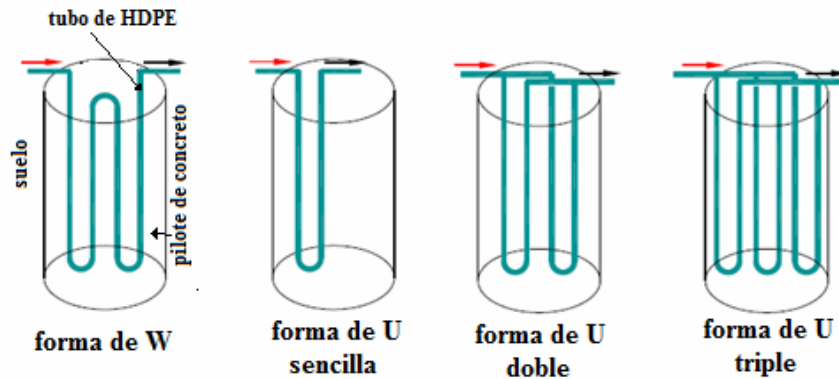


Figura 2.5. Cuatro tipos de arreglos de pilotes de energía [8].

Estos pilotes de energía fueron colocados en situ, con tubos de polietileno de alta densidad HDPE con un diámetro interno de 20 mm, y agua como fluido transportador de energía. En la tabla 2.1 se muestra el desempeño de estos pilotes de energía correspondiente a la diferencia de temperatura, la tasa de flujo, la energía extraída y el coeficiente de transferencia de calor.

Tabla 2.1 Desempeño de pilotes de energía [8].

| Tipo | Temperatura aplicada tin (°C) | Diferencia de Temperatura Δt (°C) | Rata de flujo de agua L (m ³ /h) | Energía extraída Q (W/m) | Coficiente de transferencia de Calor K (W/m °C) |
|----------------|-------------------------------|---|---|--------------------------|---|
| Forma W | 35.02 | 5.14 | 0.342 | 83.05 | 5.840 |
| Forma W doble | 34.79 | 2.91 | 0.342 x 2 | 94.25 | 6.230 |
| Forma única U | 35.13 | 3.57 | 0.342 | 57.84 | 3.891 |
| Forma doble U | 35.08 | 2.78 | 0.342 x 2 | 89.53 | 5.780 |
| Forma triple U | 34.88 | 2.25 | 0.342 x 3 | 108.07 | 6.947 |

La temperatura del suelo es de 18.2 °C en el estudio realizado por Gao et al.

La conclusión de Gao et al [8] fué que el pilote de energía en forma de W fué el más eficiente con respecto a los demás, usando una tasa media de flujo de $0.342 \text{ m}^3/\text{h}$ y extrayendo una cantidad de 83.05 W/m de energía, en comparación con los otros tipos de pilotes de energía que tuvieron que doblar (forma de W y forma doble U) o triplicar (triple forma U) la taza de flujo para llegar a alcanzar dicha cantidad de energía extraída. En complemento la forma de U sencilla no tiene suficiente energía extraída para ser considerada.

Otro caso fué expuesto por la Universidad de Tokio en Japón presentado por Ooka et al [9], el cual fue desarrollado en una forma diferente. Ellos utilizaron unos pilotes de energía con un mayor diámetro desde 1400 hasta 4000 mm, y una longitud de 20 m, colocando ocho pares de tubos con formas de U, hechos de polietileno de alta densidad o polietileno de vínculo cruzado con un diámetro de 20 o 25 mm, todos estos casos de pilotes de energía fueron colocados en situ como se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Arreglo presentado por Ooka et al [9].

El sistema demostró [9], que es posible inyectar un promedio de 186-201

W/m por pilote (25 W/m por par de tubos) durante el periodo enfriamiento. A través de un estudio económico se demostró que usando un sistema convencional de pozos intercambiadores de calor se consume 3 US\$/W adicionales debido a los costos iniciales de construcción. Mientras que utilizando el sistema de pilotes de energía el valor aproximado es de 0.79 US\$/W resultando una reducción del 74% del costo de construcción.

En la Universidad de Hokkaido, Japón por Katsura et al [10], se ensayó con pilotes de acero y concreto con la excepción de que utilizaron diámetros menores entre 400 y 500 mm respectivamente, con una longitud de 15 m. Usando arreglos de tubos en forma de U con diámetros internos de 26 o 16 mm, también colocaron agua como material que interactuaba entre los tubos y la camisa exterior (en el caso del acero y el concreto), como se ilustra en la figura 2.7.

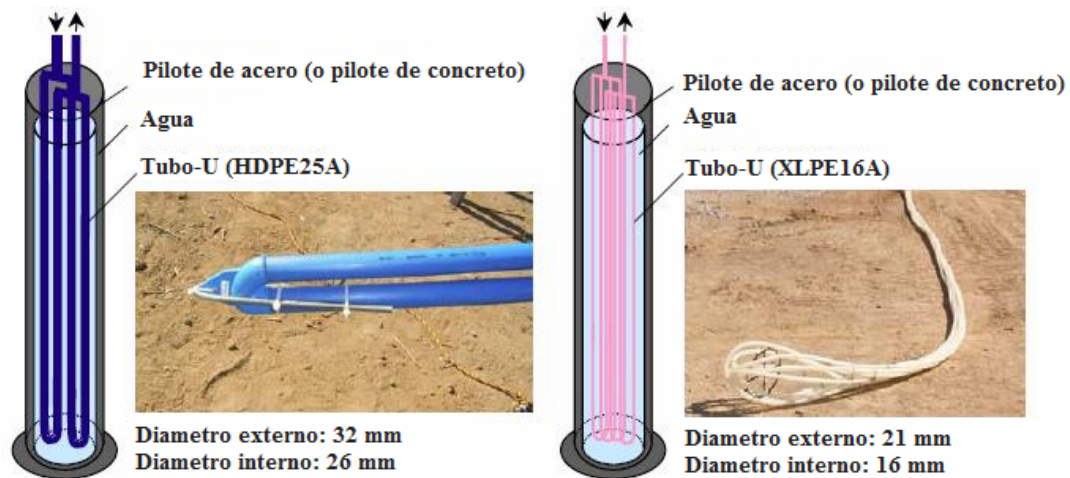


Figura 2.7 Arreglo presentado por Katsura et al [10].

Las pruebas hechas fueron llevadas a cabo con el fin de chequear la efectividad del sistema a diferentes tasas de caudales [10]. Se hicieron pruebas con

diferentes flujos volumétricos. La figura 2.8 muestra las pruebas corridas para dos pilotes de energía de acero y uno de concreto utilizando diferentes ratas de flujo. Como un ejemplo, el pilote de concreto fué evaluado con 8 y 16 l/min resultando que la cantidad de calor extraído a través del pilote de energía es cercanamente igual para ambas valores de flujo. Este ejemplo se mantiene constante en los otros dos casos.

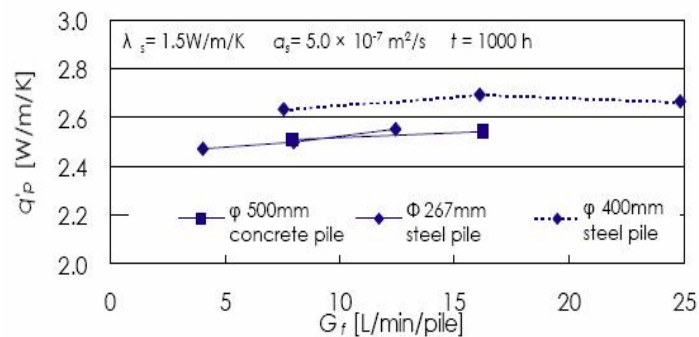


Figura 2.8 Rata de extracción de calor con respecto al flujo [10].

El último ejemplo de pilotes de energía es el usado en el Aeropuerto de Zúrich, Suiza desarrollado por Pahud [11], utilizando 360 pilotes de energía con diámetros entre 900 y 1500 mm con un promedio de longitud activa de 26.8m por pilote. Se usaron cinco pares de tubos en forma de U, colocados en situ y con un valor máximo de la rata de flujo por pilote de 860 l/h. la cantidad máxima de calor extraída por pilote fué de 72 w/m y con un promedio de 45w/m, medidos desde el 1ro de Octubre de 2005 hasta el 31 de Septiembre del 2006. Este sistema ha ahorrado al aeropuerto de Zúrich, 0.01 €/kWh, resultando un ahorro de 7200 €/W por mes.

2.4 COMSOL Multiphysics

Este es un programa que analiza y resuelve elementos finitos con diferentes

aplicaciones de módulos físicos de ingeniería. El lado fuerte de este programa es que permite acoplar diferentes módulos y que hace posible la simulación de más de un fenómeno al mismo tiempo. Esta es la razón por la cual es llamado Multiphysics. COMSOL fue creado por Germund Dahlquist, un estudiante egresado del Instituto Real de Tecnología (KTH) en Estocolmo, Suecia.

El programa también ofrece una amplia librería de materiales que simplifica el trabajo al momento de establecer los dominios del modelo y tiene unas herramientas de post procesamiento que facilitan la interpretación de los resultados. Además este también cuenta con la herramienta de Script Modeling donde hace posible trabajar de forma avanzada y desarrollar simulaciones usando diferentes variables, así como ecuaciones obtenidas por defecto en COMSOL.

COMSOL Multiphysics trabaja con los módulos mostrados en la figura 2.9, de los cuales pueden ser acoplados entre ellos de cualquier forma.

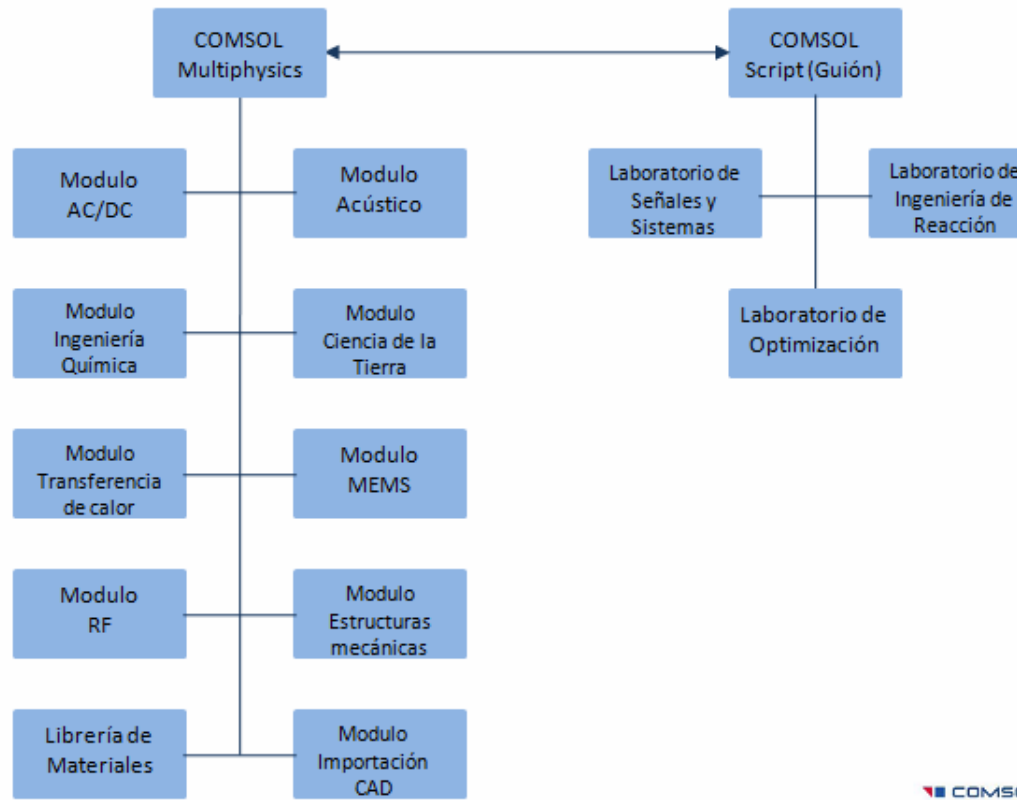


Figura 2.9. Línea de trabajo de COMSOL [12]

Para los efectos del presente proyecto, solo se utilizarán los módulos de Navier – Stokes para definir el perfil de velocidad dentro de las tuberías y el módulo de Convección y Conducción para realizar el estudio térmico. El módulo de materiales de la librería e importación de CAD forma parte de la simplificación en todos los modelos.

2.4.1 Módulo Incompresible Navier-Stokes

Este módulo trabaja con una versión generalizada de la Ecuación de Navier-Stokes para flujo laminar, implicando variables de velocidad, presión para modelos en dos y tres dimensiones. Estas ecuaciones son usadas para simplificar los modelos

al despreciar el régimen turbulento dentro de las tuberías de los pilotes de energía.

A continuación se muestran las ecuaciones de momento de transporte y de continuidad para fluidos incompresibles, correspondientes a la Ecuación 9 y la Ecuación 10, respectivamente [13].

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla * [\eta (\nabla u + (\nabla u)^T)] + \rho (u * \nabla) u + \nabla p = F \quad \text{Ec. 9.}$$

$$\nabla * u = 0 \quad \text{Ec. 10.}$$

Donde: η = Viscosidad dinámica (Pa · s).

u = Campo de velocidad (m/s).

p = Presión (Pa).

F = Campo de volumen de fuerza, como la gravedad (N).

t = Factor dependiente del tiempo (s).

2.4.2 Módulo de convección y conducción

El principio es fundamentado en la Ecuación general de transferencia de calor, como se muestra en la Ecuación 11, la cual tiene a la temperatura (T) como variable dependiente [14].

$$\delta_{is} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla * (-k \nabla T) = Q - \rho C_p u * \nabla T \quad \text{Ec. 11.}$$

Donde: δ_{ts} = Coeficiente de escala de tiempo (adimensional).

T = Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

C_p = Capacidad térmica ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

k = Tensor de conductividad térmica ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Q = Fuente o pérdida de calor (W/m^3).

Durante el análisis estacionario el valor de la temperatura no cambia a lo largo del tiempo, en consecuencia el primer término de la ecuación presentada anteriormente desaparece y es computado como se muestra en la Ecuación 12 [14].

$$-\nabla \cdot (k \nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T \quad \text{Ec. 12.}$$

Con la finalidad de describir la influencia de la dinámica del fluido sobre la transferencia de calor y viceversa, ambos de los previos módulos son acoplados, por medio del campo de velocidad (u) resultante de las ecuaciones de Navier-Stokes. Este resultado servirá como valores de entrada del análisis térmico para el módulo de convección y conducción.

Las propiedades termofísicas del fluido aplicado (agua) son mantenidas constantes mientras se resuelven la Ecuación 11, i.e.: se asume que la densidad y la viscosidad no cambian con la temperatura.

2.5 Software SAP2000 v11

Este programa brinda una amigable interface para realizar cualquier tipo de diseños estructurales, desde análisis sencillos en dos dimensiones hasta grandes y

complejas estructuras que requieren análisis dinámicos.

A continuación se mencionara los diferentes casos de análisis que permite realizar este programa [15]:

- Análisis linear estático.
- Análisis Modal
- Análisis según el espectro de respuesta.

Estos tres casos de análisis presentados generan un campo amplio para el análisis de cualquier tipo de estructura. Sin embargo para los efectos de este proyecto solo será utilizado el análisis linear estático, el cual nos permitirá calcular las deformaciones axiales para cada tipo de pilotes, tanto para el pilote convencional como para los pilotes de energía.

Las ecuaciones necesarias para el análisis linear estático corresponden a la Ley de Hooke dictando que una deformación unitaria multiplicada por un módulo de elasticidad resulta un esfuerzo [15], esto se puede apreciar en la Ecuación 13 que se presenta a continuación.

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Ec. 13.}$$

Donde: σ = Vector de esfuerzo (N/m²).

E = Módulo de elasticidad (N/m²).

ε = Vector de deformación normal (m/m).

La aplicación del módulo para estructuras mecánicas se encuentra basada en el principio de trabajo virtual, los grados de libertad son definidos por la geometría

de cada modelo. Este modelo utiliza posicionamiento global en las direcciones “x, y, z” y ángulos de rotación alrededor de mismos ejes.

La Ecuación 14 aumenta su complejidad al representar la relación esfuerzo-deformación incluyendo términos de esfuerzos iniciales y deformación por temperatura, el cual se muestra a continuación [15]:

$$\sigma = E\varepsilon_{el} + \sigma_i \quad \text{Ec. 14}$$

Donde: $\varepsilon_{el} = \varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_i$

..... ε_{el} = Deformación elástica (m/m).

..... ε = Deformación total (m/m).

..... ε_{th} = Deformación debida a la temperatura (m/m).

..... ε_i = Deformación inicial (m/m).

..... σ_i = Esfuerzo inicial (N/m²).

2.6 Ensamblaje de los pilotes de energía

La combinación de un pilote con un sistema de intercambiadores de calor, requiere un cuidadoso arreglo de tuberías dispuestas acorde con los planos, debido a que el desempeño dependerá de la distancia entre los tubos y el borde exterior del pilote, i.e.: si la distancia es mayor a la calculada (entre la pared externa del pilote y

el tubo) la extracción de calor va a ser pobre y si esta distancia es menor, la extracción de calor será mayor a la calculada. También el comportamiento estructural podría ser afectado si los tubos no respetan el debido recubrimiento del acero de refuerzo. El ensamblaje de los pilotes de energía pueden ser de dos formas: primero, si el pilote de energía es prefabricado y segundo si es colocado en situ.

El proceso de la fabricación de pilotes prefabricados comienza con el encofrado de madera o metal que provee la forma del pilote de acuerdo a las dimensiones calculadas, continuando al colocar espaciadores en el encofrado para darle al refuerzo su colocación específica. Luego de que los espaciadores han sido ubicados se coloca el refuerzo de acero en su lugar. Este proceso es típico en la fabricación de pilotes prefabricados. El próximo paso es la colocación de los tubos que funcionan como intercambiadores de calor, esto puede ser fijado con diversos métodos, el cual su procedimiento exacto cambia con respecto a las preferencias del constructor. Luego de que el pilote de energía es fabricado se traslada a la obra para ser hincado. Las tuberías utilizadas para los pilotes de energía lucen como las mostradas en la figura 2.10.

El proceso de instalación de los pilotes en situ inicia normalmente al perforar un pozo en el suelo de acuerdo a las dimensiones de los planos. En paralelo, se trabaja el refuerzo de acero y las tuberías para hacer colocadas en el lugar. Luego de que el pozo, el refuerzo y las tuberías han sido armadas se inicia el proceso de instalación colocando el refuerzo y las tuberías dentro del agujero, como se ilustra en la figura 2.6, cuidando que las dimensiones sean respetadas. El paso final es la colocación del concreto dentro del suelo y la espera de que el concreto fragüe.



Figura 2.10. Muestra de tubería utilizada en pilotes de energía y en BHE [16].

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Metodología

Este proyecto es desarrollado en diferentes etapas en función de alcanzar modelos eficientes y resultados que se aproximen a la realidad.

3.1.1 Estudio de la literatura

Gran parte de la literatura fue obtenida leyendo artículos científicos y libros sobre pilotes, pozos intercambiadores de calor, pilotes de energía, suelo y fundaciones, y toda aquella información usada para darle fundamento al marco teórico. El producto de este trabajo es reflejado en el marco teórico y permite alcanzar el primer objetivo.

3.1.2 Simulaciones con COMSOL Multiphysics

Para el análisis de los diferentes modelos térmicos se utilizó el software COMSOL Multiphysics, por lo que fue necesario el estudio de dicho programa; incluyendo modelado, trabajo de malla y talleres brindados por personal de COMSOL. Lo mencionado anteriormente fue seguido por significantes horas individuales de trabajo usando el programa. Los modelos son explicados en detalles en el capítulo III para el análisis térmico. La complejidad de las simulaciones de los modelos fué incrementada gradualmente al añadir mayor número de condiciones de bordes.

3.1.3 Simulaciones con SAP2000 v11

Adicionalmente, gracias a las instrucciones dadas sobre el programa por el profesor asesor y la lectura de manuales relacionados, fué posible realizar todas las simulaciones estructurales y analizarlas utilizando el software SAP 2000 v11, con la finalidad de comparar algunos resultados.

3.1.4 Generación de geometría y modelos

Los modelos generados con las formas de U, W y Coaxial son fundamentados en el marco teórico, creando los modelos más comunes usados hoy en día y aquellos que pueden alcanzar posiblemente un mejor desempeño.

3.1.5 Análisis de resultados

Las conclusiones relacionadas a los resultados, involucran la selección de los pilotes de energía más eficientes, de acuerdo al desempeño de intercambio de energía y el mejor comportamiento estructural. La validación de los resultados obtenidos en los modelos se hará mediante la data proveniente del fundamento teórico.

3.2 Análisis térmico

En este capítulo se demostrará en detalle cada etapa del proceso del análisis térmico de los pilotes de energía, el cual se divide en tres partes principales: análisis longitudinal, transversal y sección transversal en grupo. Todas estas simulaciones han sido realizadas a través del programa COMSOL Multiphysics, versión 3.5 usando dos módulos acoplados, incompresible Navier-Stokes con el propósito de darle a los modelos un perfil de velocidad y el módulo de convección y conducción para el análisis de transferencia de calor. Las ecuaciones de dichos módulos han sido explicadas en la sección 2.4

Las propiedades térmicas usadas en los modelos longitudinal, transversal y sección transversal en grupo, se mantuvieron constantes, con el fin de garantizar un mismo perfil térmico, como se muestra en la siguiente tabla 3.1.

Tabla 3.1. Propiedades Térmicas [17].

| Materiales | K. Conductividad térmica (W/m.°C) | Cp. Capacidad de calor (J/Kg.°C) | Rho. Densidad (Kg/m³) |
|-----------------------------------|--|---|---|
| Concreto | 1.4 | 880 | 2300 |
| Arcilla | 1.3 | 880 | 1460 |
| Polietileno de alta densidad** | 0.42 | Librería de Materiales | Librería de Materiales |
| Agua *** | Librería de Materiales* | Librería de Materiales | 1000 |

*Los materiales de la librería forman parte de la base de datos del programa COMSOL, conteniendo ecuaciones para diferentes tipos de materiales; **los tubos solo son modelados en el análisis transversal; ***es usado la viscosidad dinámica del agua para el módulo de Navier-Stokes, de acuerdo al valor de 1800 Pa.s.

3.2.1 Modelado Longitudinal

El modelado longitudinal es hecho para tres tipos de pilotes de energía: el de forma de U, W y Coaxial, los cuales son representados en figuras de tres dimensiones (Figura 3.1 y Figura 3.2), donde el modelo principal es mostrado en la parte (a) de la imagen, el detalle superior del pilote de energía en la parte (b) y el fondo en la parte (c).

El pilote de energía con forma de U tiene un par de canales de agua (14.7 m de longitud), unidos en el fondo del pilote, con la finalidad de darle al fluido una trayectoria completa de intercambio de calor, desde el tope hasta el fondo del pilote. Para el pilote de energía con forma de W sucede el mismo caso, sin embargo el número de tuberías se duplica para que así el fluido circulante viaje de forma descendente y ascendente una vez más luego de la primera curva. Este modelo de intercambiadores de calor ha sido utilizado por Gao et al [8] y fué modelado con la finalidad de analizar el comportamiento de la transferencia de calor debido a la segunda curvatura. Ambos pilotes de energía se muestran en la Figura 3.1.

El pilote de energía con forma Coaxial trabaja de forma diferente (Ilustrados en la Figura 3.2), este tiene una tubería completamente aislada térmicamente en el centro que le da al fluido su dirección descendente, el cual en el fondo del pilote se divide en ocho curvas, entregando el fluido a tuberías de menor diámetro con la finalidad de llevarlos hasta arriba. Dichas tuberías representan los intercambiadores de calor y la tubería central se encuentra inactiva con la finalidad de simplificar el modelo térmico. Este modelo es sugerido por Platell [7].

Los tres tipos de pilotes de energía han sido analizados bajo las mismas condiciones con el fin de mantener la consistencia en todos los modelos i.e.: el perfil de temperatura del suelo, la temperatura de entrada, el flujo volumétrico y las propiedades térmicas son constantes. Estos modelos son simulados con los módulos acoplados mencionados anteriormente en la sección 2.4.

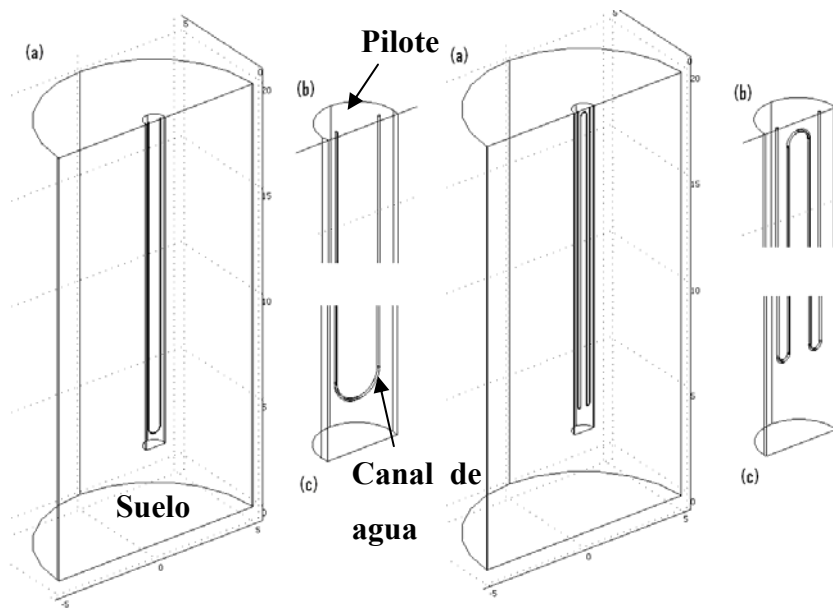


Figura 3.1. Planos de los pilotes de energía en tres dimensiones; Forma de U (Izquierda); Forma de W (Derecha). Modelo principal (a); Tope (b); Fondo (c).

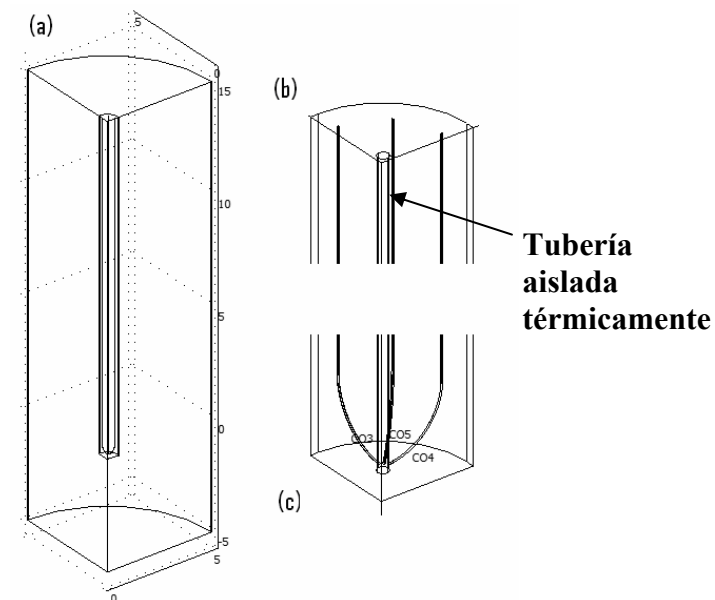


Figura 3.2. Planos de los pilotes de energía con forma Coaxial en tres dimensiones;

modelo principal (a); Tope (b); Fondo (c).

3.2.1.1 Análisis estacionario

Este análisis fué realizado para tres tipos de pilotes de energía con unas geometrías de tres dimensiones, como se ilustra en la Figura 3.1 y figura 3.2 mostradas previamente. Sólo fué modelado la mitad de los pilotes de energía de forma de U y W y un cuarto del modelo coaxial con la finalidad de simplificar el modelo. Estos han sido resueltos en coordenadas Cartesianas. Cada pilote de energía tiene sus respectivas dimensiones de acuerdo con la figura 3.3, adicional a esto el suelo que rodea cada pilote cumple las dimensiones de 20 m de altura y 5 m de radio lo cual puede ser apreciado en la figura 3.1 y la figura 3.2, y los pilotes tienen una altura de 15 m y 0,5 m de radio (ver figura 3.3).

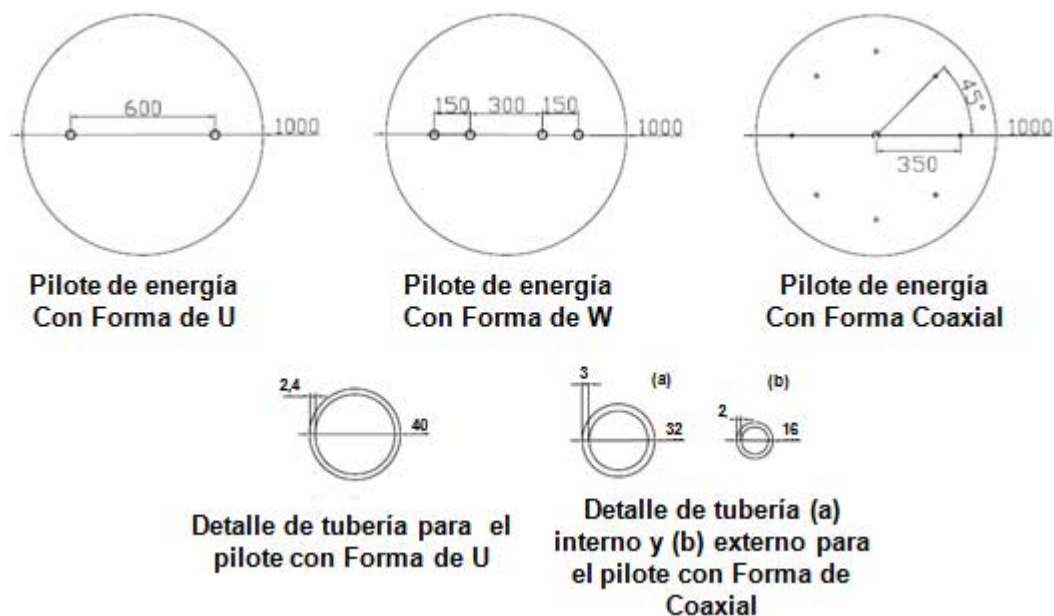


Figura 3.3. Sección transversal y detalle de tuberías para los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial (unidades en mm).

Arreglos de los subdominios

Las tabla 3.2 y tabla 2.3 representan los valores de cada subdominio para los modelos de Navier-Stokes, convección y conducción respectivamente. Estos son los valores iniciales de cada subdominio utilizados en el análisis.

Tabla 3.2. Subdominios para el módulo de Navier-Stokes.

| Navier-Stokes | | |
|----------------------|-------------------|--------------|
| Subdominios | Ajuste | Valor |
| Agua | Velocidad Inicial | 0.0 m/s |
| Pilote y Suelo | Inactivo | |

Tabla 3.3. Subdominios para el módulo de Convección y conducción

| Convección y Conducción | | |
|--------------------------------|---------------------|-------------------|
| Subdominios | Ajustes | Valor (°C) |
| Agua | Temperatura Inicial | 0,84 |
| Pilote | Temperatura Inicial | 7,84 |
| Suelo | Temperatura Inicial | 7,84 |

La tabla 3.1 mencionada al inicio del capítulo proporciona los valores térmicos necesarios para realizar el análisis, tales como: conductividad térmica, capacidad térmica y densidad.

Condiciones de borde

Estos modelos han sido evaluados por los módulos de Navier-Stokes, convección y conducción de acuerdo a los valores mostrados en la tabla 3.4 y tabla 3.5 respectivamente. La velocidad de entrada en el modelo coaxial difiere al resto

debido al cambio de diámetro del canal de agua previamente explicado. Sin embargo vale la pena mencionar que el flujo volumétrico es mantenido constante.

Tabla 3.4. Condiciones de borde para Navier-Stokes

| Navier-Stokes | | |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Bordes | Ajuste | Valor |
| Entrada Agua forma U, W. | Velocidad | 0.120 m/s |
| Entrada Agua Coaxial | Velocidad | 0.129m/s |
| Salida | Presión | 0.000 Pa |
| Pared tubos | Velocidad | 0.000 m/s |

Tabla 3.5. Condiciones de borde para la Convección y conducción

| Convección y Conducción | | |
|--------------------------------|----------------------|--------------|
| Bordes | Ajuste | Valor |
| Entrada Agua | Temperatura | 0,84 °C |
| Salida Agua | Flujo por convección | |
| Paredes y fondo del suelo | Temperatura | 7,84 °C |
| Tope del Suelo y pilote | Aislamiento térmico | |

Arreglos de malla

Estos modelos requieren dos tipos de malla para cada módulo, debido a que los canales de flujo de agua tienen que estar bien definidos para ser aplicados al módulo de convección.

En el módulo de Navier-Stokes fué necesario colocarle malla al fluido, usando malla tipo mapped para el tope del mismo y luego fué barrido a lo largo del subdominio. Este tipo de malla tomó alrededor de 2200 elementos por canal y es mostrado en la figura 3.4.

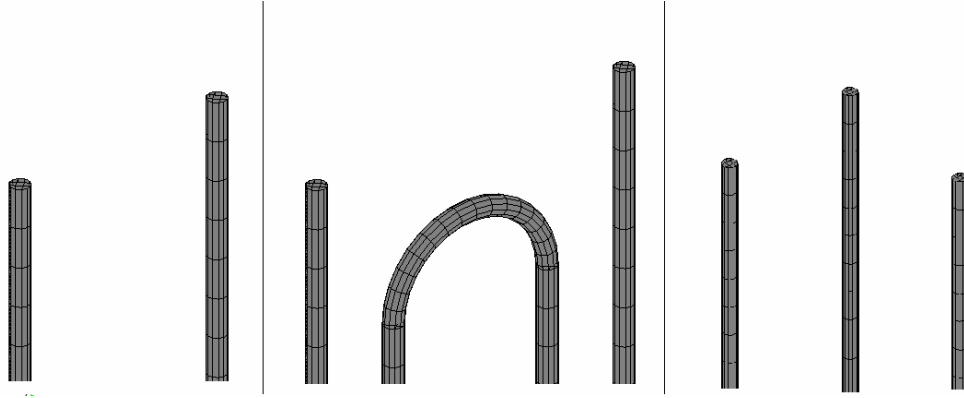


Figura 3.4. Malla para el módulo de Navier-Stokes para los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial

La tabla 3.6 y la figura 3.5 ilustran el tipo de malla utilizado para los subdominios al módulo de convección y conducción.

Tabla 3.6. Ajustes de malla para el módulo de convección y conducción.

| | |
|--------------------------------------|---|
| Número de elementos forma de U | 91500 |
| Número de elementos forma de W | 162800 |
| Número de elementos forma de Coaxial | 149800 |
| Tipo de malla en el canal de agua | Extra fino malla libre (regular) |
| Tipo de malla en el pilote y suelo | Extremamente gruesa malla libre (regular) |

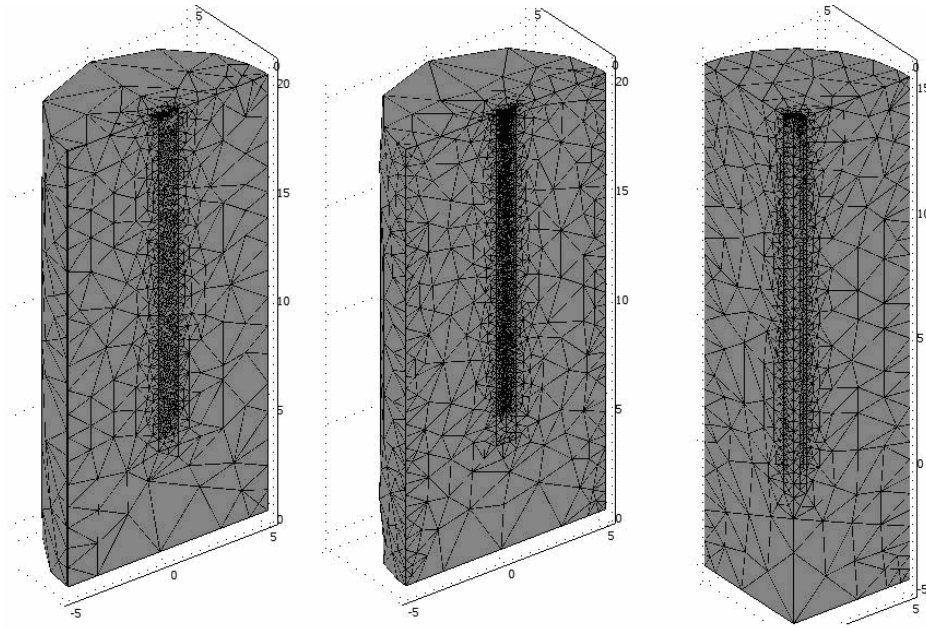


Figura 3.5. Malla para el módulo de convección y conducción para los modelos de forma de U, W y Coaxial, respectivamente

Los elementos usados en el módulo de Navier-Stokes proveen un ángulo de 90° entre cada elemento, formando figuras cuadradas y rectangulares en el plano (ver figura 3.4). Este tipo de arreglo de elementos le da un perfil de velocidad suave al fluido, ideal para el análisis térmico. La malla utilizada en el módulo de convección y conducción es llamada malla libre y produce elementos de 3 lados, los cuales no tienen ninguna limitación con el ángulo formado entre ellos. La malla generada en cada canal de agua tiene alrededor de 12000 elementos. La combinación de estos dos tipos de malla para cada módulo optimiza los resultados, sin embargo los mismos aumentan el tiempo que toma procesar estos modelos.

3.2.1.2 Resultados del análisis estacionario

Los resultados del análisis estacionario de acuerdo a las ecuaciones de Navier-Stokes en la salida de cada canal de agua son mostrados en la siguiente figura 3.6. El perfil de velocidad es descrito por valores que se incrementan a medida a que se aproxima al centro de la tubería, lo cual se mantiene a lo largo del canal de agua. Ahora bien si repasamos los valores en la entrada de la tubería estos se mantienen constante en toda la sección transversal, debido a que representa la condición de borde de entrada. Las velocidades son medidas en metros por segundo.

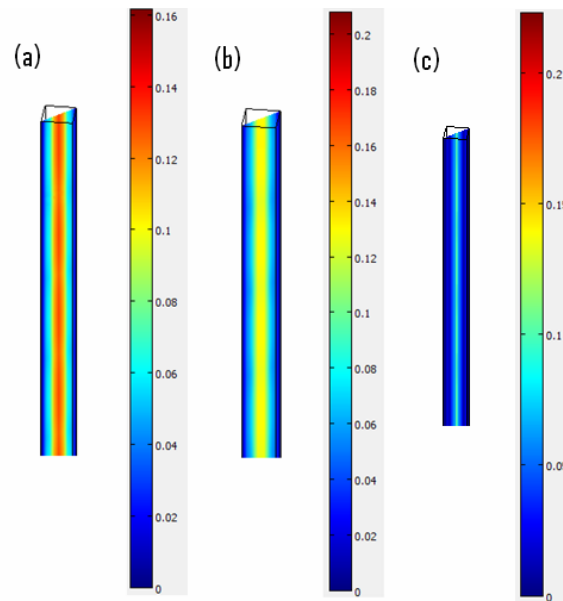


Figura 3.6. Resultados del campo de velocidad calculado con el módulo de Navier-Stokes para los pilotes de energía con forma de U(a), W (b) y Coaxial(c).

En la figura 3.6 se puede observar que el perfil de velocidad aumenta desde las paredes del canal (0,0 m/s) hacia el centro (0.12 m/s para la forma U (a), W (b) y la forma coaxial (c)). El perfil de velocidad es laminar de acuerdo a estas figuras.

Debido a que el módulo de Navier-Stokes genera flujo laminar, el valor de velocidad inicial asignado para la simulación es bajo (0.12 para el modelo de forma de U, W y 0.129 para el modelo de forma coaxial, de acuerdo a la tabla 3.4). Entonces es recomendado realizar estudios más complejos utilizando flujos turbulentos los cuales son más aproximados a la realidad.

A continuación, se muestran los resultados del módulo de convección y conducción, luego de ser aplicado los resultados del perfil de velocidad (módulo de Navier-Stokes) como valor de entrada. La Figura 3.7, la Figura 3.8 y la Figura 3.9 ilustran una vista general de los pilotes de energía en tres dimensiones (a), el detalle de la parte superior (b) y del fondo (c) respectivamente, para los tres modelos mencionados. Los dos últimos muestran superficies isotérmicas. Estas figuras describen la distribución de temperatura debido al análisis estacionario. Es posible notar que las mas altas temperaturas son alcanzadas en las paredes del suelo, los cuales representan la condición de borde para cada modelo (a) y también las más bajas temperaturas rodeando la entrada de agua para los pilotes de energía de forma de U y W (b).

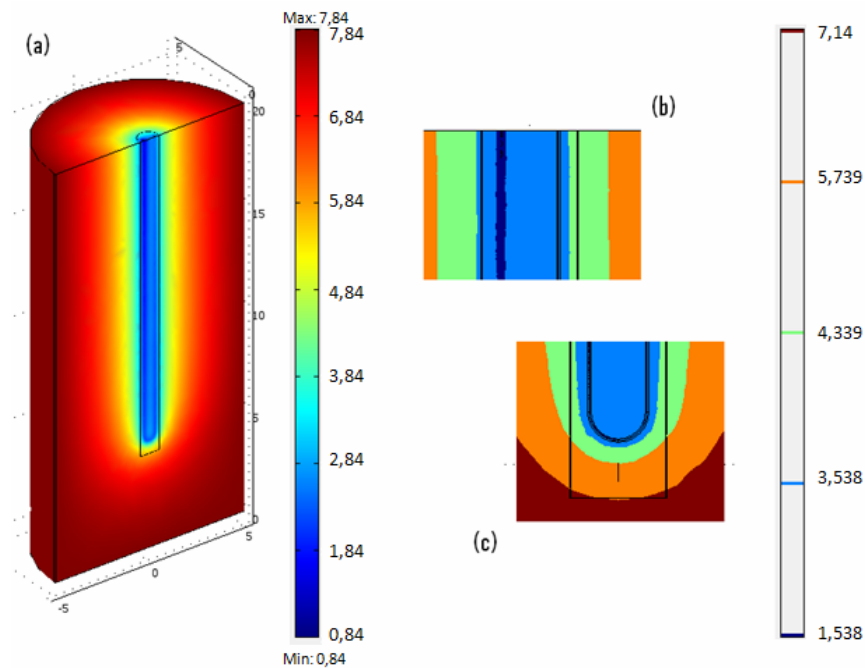


Figura 3.7. Resultado del pilote de energía de forma de U (°C)

La Figura 3.7 (c) permite notar que el pilote de energía con forma de U alcanza en el fondo del pilote casi la misma temperatura del fluido (alrededor de 4,339 °C) de acuerdo a la temperatura de la superficie isotérmica. Sin embargo para el pilote de energía con forma de W este punto es alcanzado en el tope de la trayectoria del fluido (b) cuando el agua comienza la segunda curvatura, como se muestra en la figura 3.8.

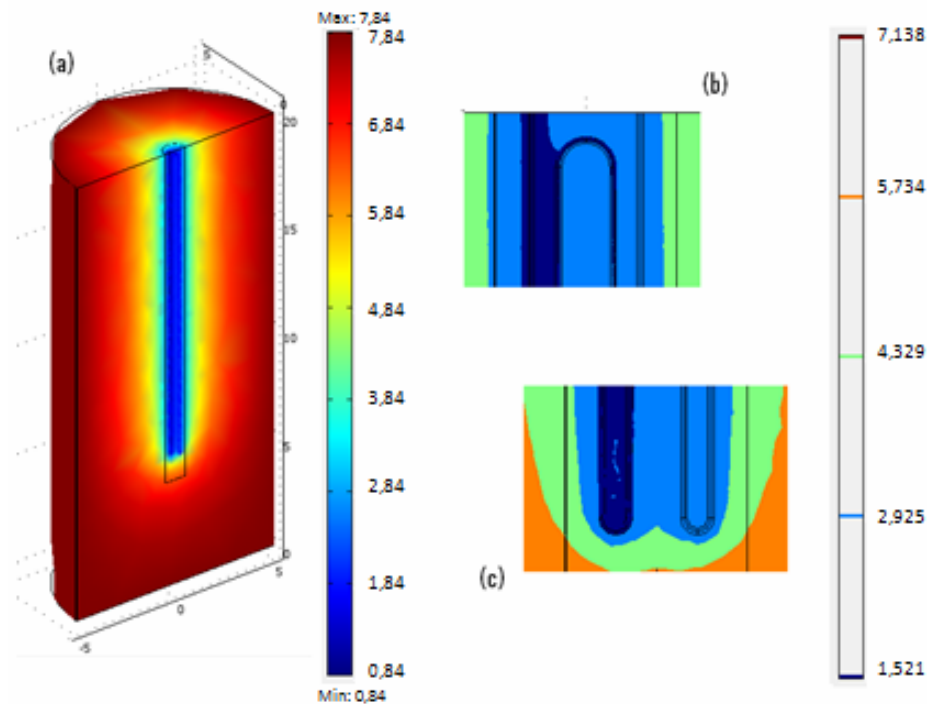


Figura 3.8. Resultado del pilote de energía de forma de W ($^{\circ}\text{C}$).

El pilote de energía de forma coaxial alcanza las más bajas temperaturas en el fondo del pilote, debido a la condición de entrada fué seleccionada en el fondo del mismo (asumiendo que el canal central está completamente aislado), esto hace que la temperatura de la superficie isotérmica vaya rodeando la entrada del agua, incrementándose la temperatura a medida que avanza el fluido, como se puede apreciar en la figura 3.9 (c) y (b).

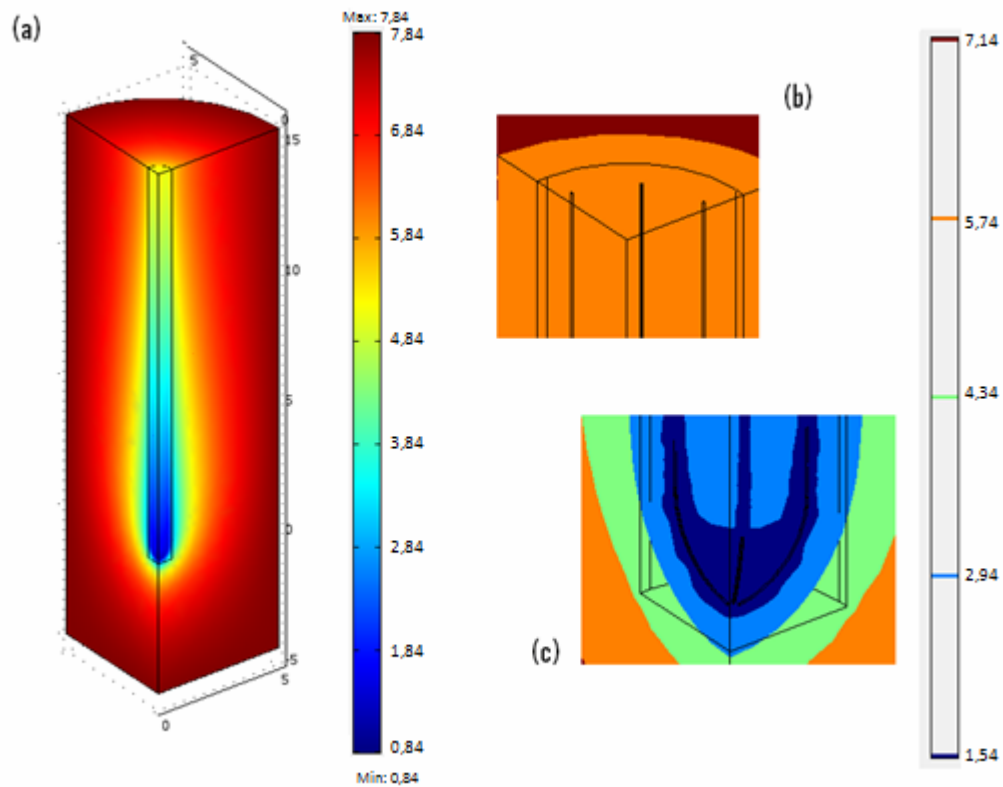


Figura 3.9. Resultado del pilote de energía de forma de Coaxial ($^{\circ}\text{C}$).

La parte (a) de la figuras en tres dimensiones (Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9) proporcionan una forma útil de visualizar la distribución de la temperatura en cada pilote de energía, el cual hace interesante el análisis de diferentes tipos de geometrías o el estudio de los mismos pilotes de energía pero sólo ajustando pocas dimensiones hasta que el modelo alcance su óptimo desempeño.

Esto puede ser apreciado con mucho más detalle en los pilotes de energía con forma de U y W en las partes (b), por la superficie isotérmica rodeando el primer canal descendiente, para el de forma de W ($1,521^{\circ}\text{C}$) y el correspondiente al fluido bajante para el de forma de U ($1,538^{\circ}\text{C}$). En la figura 3.8, la temperatura del agua en

el primer canal que sube es altamente afectado por el fluido de agua en dirección contraria, sin embargo; la temperatura de fluido cambiará de acuerdo a la distancia (separación) entre cada canal de agua. También puede ser visto en el perfil de temperatura en el análisis transitorio (ver figura 3.15) donde se muestra temperatura contra la profundidad para cada pilote de energía. Los resultados se explican en detalle en la sección 3.1.3.

En orden de alcanzar el objetivo número 5, es significativo analizar el comportamiento de los pilotes de energía de la misma forma que los presentados por Gao et al [8], Ooka, et al [9] y discutidos en la sección 1.5. La tabla 3.7 agrupa los resultados de los tres modelos presentados en este proyecto y en la última columna se disponen los resultados del cálculos de la energía extraída usando la Ecuación 10.

Tabla 3.7. Resumen de los resultados del análisis estacionario debido a la extracción de energía por metro.

| Pilotes de energía | Temperatura Inicial (°C) | Diferencia de temperatura entre la entrada y salida [°C] | Energía extraída [W/m] |
|---------------------------|---------------------------------|---|-------------------------------|
| Forma de U | 0,84 | 1,26 | 17,264 |
| Forma de W | 0,84 | 1,2 | 16,442 |
| Forma de Coaxial | 0,84 | 4,15 | 56,862 |

El calor extraído por metro obtenido de la simulación se encuentra en el mismo rango de aquellos presentados por Gao, et al [8] y Ooka, et al [9] los cuales son normales a las condiciones reales. Las diferencias son simplemente justificadas por el hecho de que las condiciones de trabajo en sus experimentos no fueron exactamente las mismas utilizados en estos modelos.

3.2.1 Análisis transitorios

El análisis transitorio ha sido estudiado a través de la Ecuación del módulo de convección y conducción con dependencia de tiempo. Las ecuaciones del módulo de Navier-Stokes son consideradas estacionarias, asumiendo que el perfil de velocidad no es alterado en el tiempo.

Todos estos pilotes de energía fueron simulados con un periodo de tiempo constante, este periodo de tiempo es equivalente a un día. Los pilotes de energía de forma U, W y coaxial fueron computados bajo las mismas condiciones de borde, subdominio y arreglos de mallas a los usados en el análisis estacionario de acuerdo a la sección 3.1.1.

3.2.1.2 Resultado del análisis transitorio

La figura 3.10 y la figura 3.11 ilustran los resultados del análisis transitorio para un periodo de tiempo de 24 horas, de acuerdo a las respectivas geometrías. La figura 3.10 (a) representa la distribución de temperatura en tres dimensiones para los pilotes de energía de forma de U y W, mientras que la figura 3.10 (b) y (c) muestran las temperaturas resultantes del tope y del fondo de las geometrías respectivamente, representado por superficies isotérmicas. Similarmente la figura 3.11 (a) muestra el perfil de temperatura del pilote de energía con forma Coaxial en tres dimensiones y la figura 3.11 (d) ilustra el detalle de las condiciones en el fondo del pilote por medio de superficies isotérmicos.

Como se puede apreciar en la figura 3.10 y figura 3.11, la temperatura del suelo no está siendo altamente afectado por la extracción de calor en este período, al ilustrarse la mayor parte del suelo de color rojo, lo cual representa el valor inicial de temperatura (7,84 °C, como se muestra en la tabla 4). Ellas también muestran

claramente, (como es esperado), que las bajas temperaturas se ubican alrededor de las entradas de agua para los pilotes de energía con forma de U y W en figura 3.10 (b) y en la figura 3.11 (d) para el de forma coaxial.

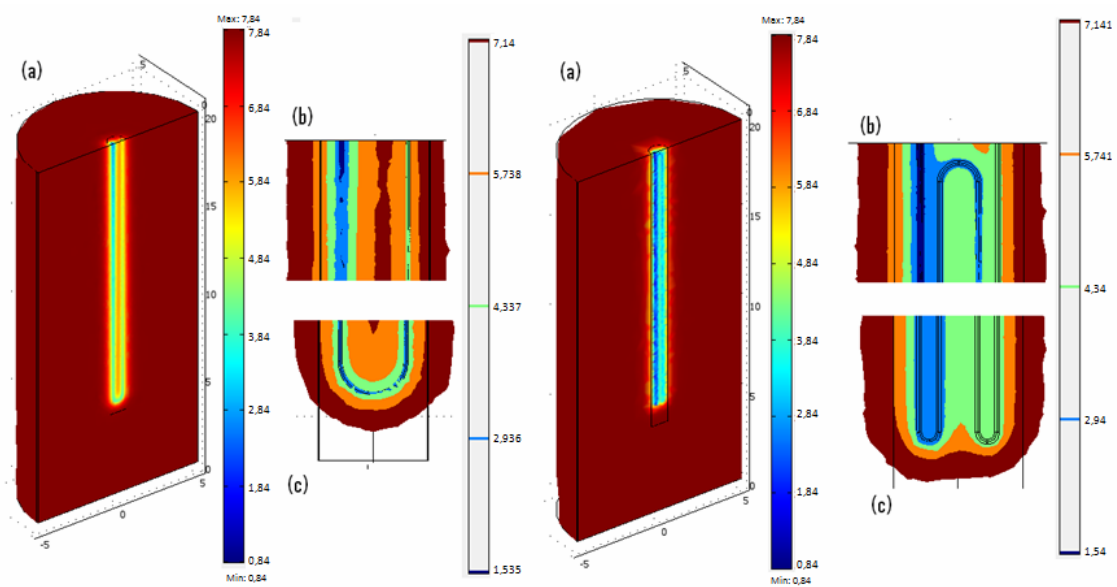


Figura 3.10. Resultados transitorios de los modelos con forma de U y W (°C)

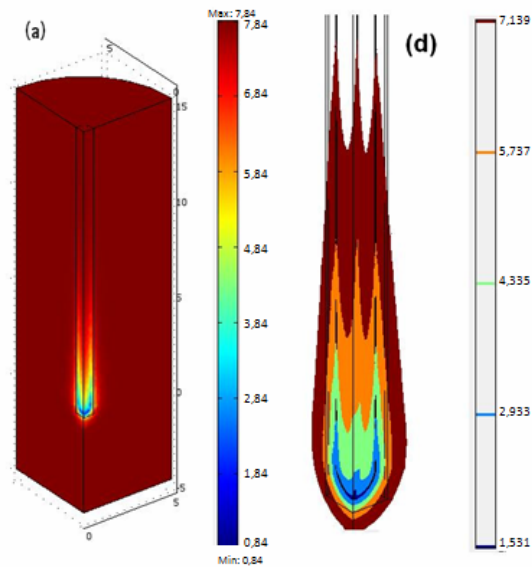


Figura 3.11. Resultados transitorios de los modelos con forma Coaxial ($^{\circ}\text{C}$).

Para complementar los resultados previos se ilustra el perfil de temperatura versus profundidad para los diferentes tipos de arreglos en la Figura 3.12, Figura 3.13 y la Figura 3.14 los cuales muestran la variación de temperatura del agua a lo largo de la profundidad para el de forma de U, W y coaxial respectivamente, a lo largo del recorrido del fluido. La Figura 3.15 ensambla las últimas tres figuras en una, disponiendo una mejor apreciación del desempeño térmico de todos los pilotes de energía para ser comparados.

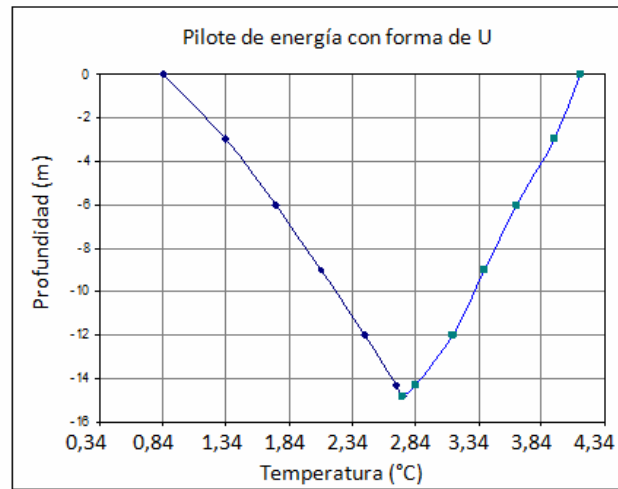


Figura 3.12. Profundidad Vs la temperatura para el pilote de energía con forma de U.

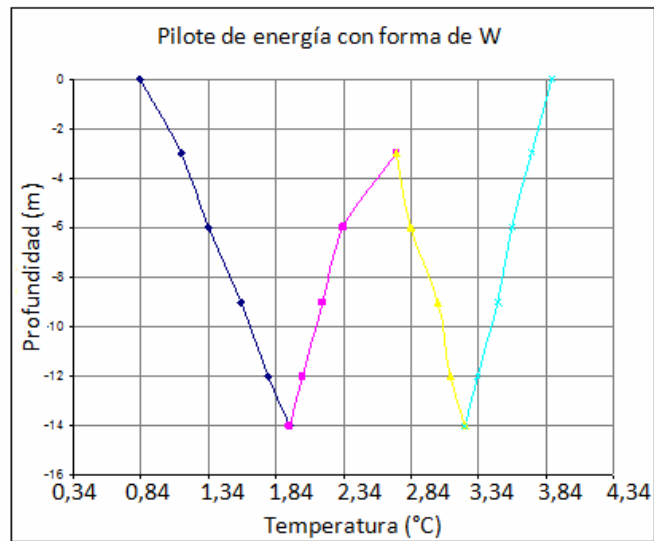


Figura 3.13. Profundidad Vs la temperatura para el pilote de energía con forma de W.

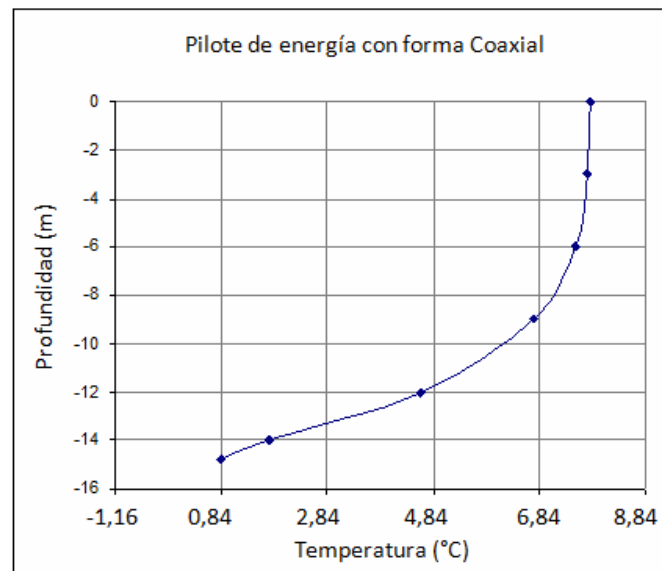


Figura 3.14. Profundidad Vs la temperatura para el pilote de energía con forma Coaxial.

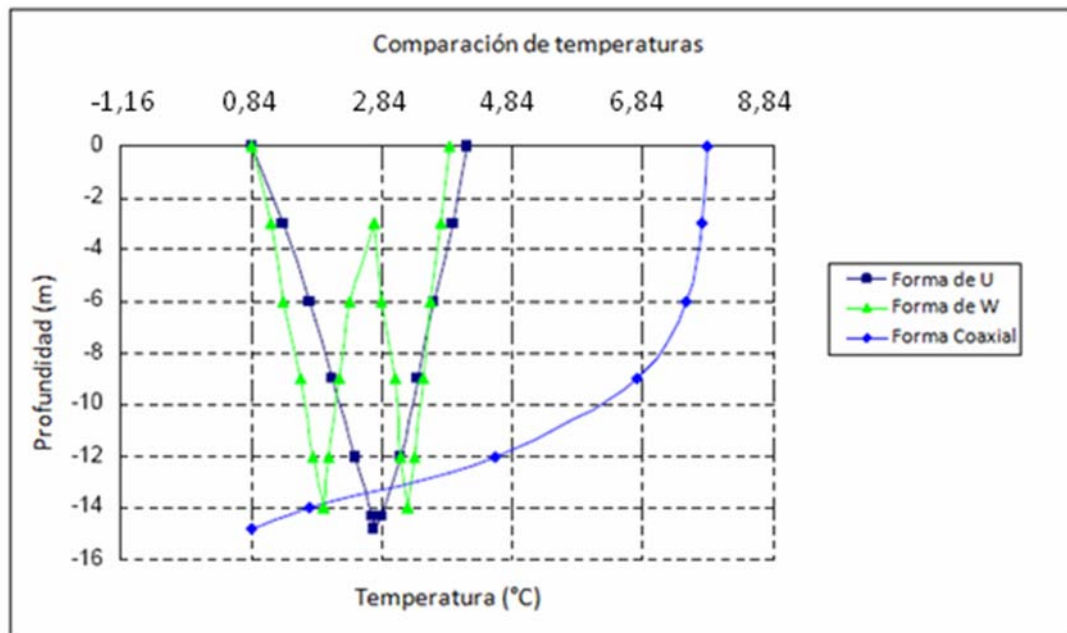


Figura 3.15. Comparación de las temperaturas para los tres casos de pilotes de energía.

La figura 3.15 ilustra la comparación de las temperaturas de los tres tipos de los pilotes de energía (en forma de U, W y coaxial) a lo largo del recorrido del fluido, al tener en el eje horizontal la temperatura y sobre el eje vertical la profundidad. Cada pilote de energía tiene puntos de temperatura ploteados a 3, 6, 9, 12 m de profundidad para cada canal, y en el punto más profundo de cada uno de ellos. La ventaja de tener esta figura es que simplifica la comparación de las temperaturas entre cada modelo y permite revisar cual es el que proporciona mejor intercambio de calor con el suelo. El tubo central del pilote de energía con forma Coaxial se encuentra perfectamente aislado térmicamente, el cual explica el porqué la temperatura en el fondo es de 0,84 °C.

La figura 3.15 nos lleva a concluir que el canal de fluido con la temperatura que es capaz de alcanzar la temperatura más cercana a la del suelo de los tres modelos presentados es la que utiliza el pilote de energía con forma coaxial (7,63 °C), seguido por el pilote de energía con forma de U (4,14 °C) y por último el pilote de energía con forma de W (3,89 °C). Es importante recordar que estos resultados son dependientes de un periodo de tiempo fijado a 24 horas.

El pilote de energía con forma coaxial alcanza alrededor de una temperatura constante, aproximadamente a los 6 m del tope del pilote, significando que tiene un eficiente intercambio de calor con el suelo. Sin embargo, si la tubería central no estuviese térmicamente aislada existiría la probabilidad de riesgo a que caiga la temperatura debido a esta sección.

Llama la atención estudiar el mismo caso del pilote de energía con forma de U, no obstante; cambiando la distancia de separación entre los canales de agua, pero respetando mantener constante los subdominios, condiciones de borde y parámetros de malla para no perder la consistencia en el estudio.

Este análisis extra esta hecho en orden de chequear cuanto afecta el flujo descendiente al flujo ascendiente debido a las diferencias de temperaturas y distancias que separa los tubos. El resultado de esta comparación es mostrada en la figura 3.16. Mayor información sobre los pilotes de energía con forma de U (con canales de aguas cercanos) es mostrada en el apéndice térmico respectivo a la sección 7.1.

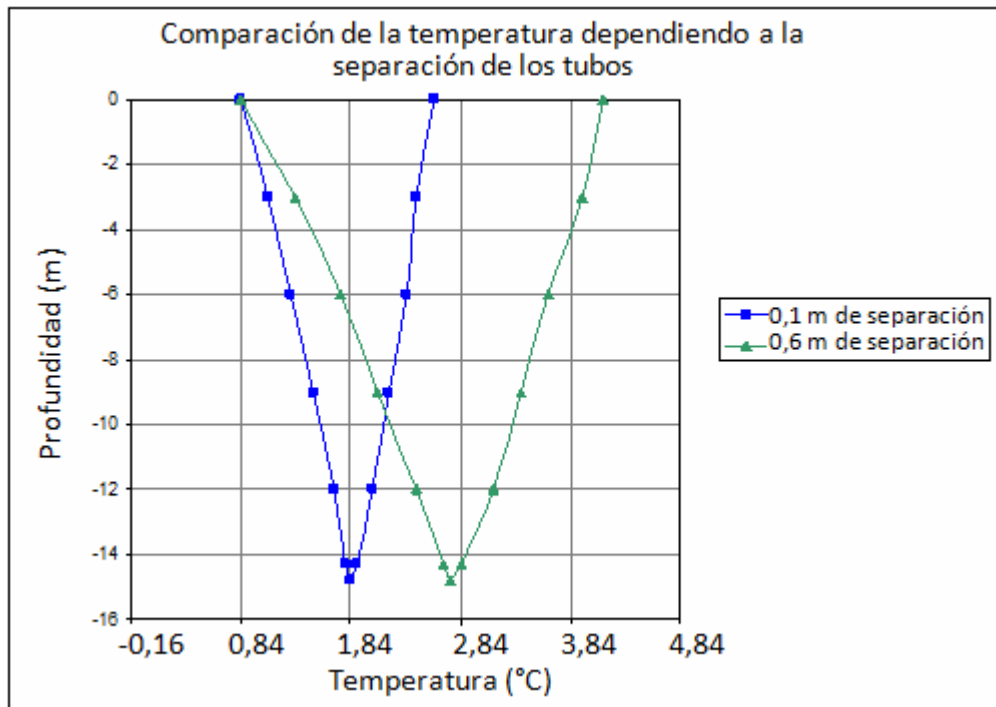


Figura 3.16. Comparación de la separación de canales de agua para el pilote de energía con forma de U.

Como es ilustrado en la figura 3.16 (Profundidad Vs. temperatura) el perfil de temperatura disminuye a reducir la separación entre los canales de agua. La diferencia de temperatura entre estos dos modelos en la salida del fluido es alrededor de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en el fondo de la curva rodea $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto representa una notable diferencia de temperaturas que nos permite concluir que es necesario utilizar el diámetro de los pilotes con la finalidad de extraer la mayor cantidad de energía posible del suelo, al separar el fluido descendiente del ascendiente lo máximo posible.

Otro caso que vale la pena presentar es el correspondiente a tener un periodo de tiempo más corto, la figura 3.17 es el resultado de dicha comparación, teniendo dos periodos de tiempo; 251 segundos, el cual representa el tiempo que toma el fluido en

viajar desde la condición de entrada hasta la final, y 24 horas de periodo de tiempo usado en los caso anteriores. Esto es analizado con la finalidad de ver cuánto es afectado el perfil de temperatura con respecto a los diferentes periodos de tiempo. Información profundizada sobre este modelo se encuentra en la sección 7.2 del apéndice térmico.

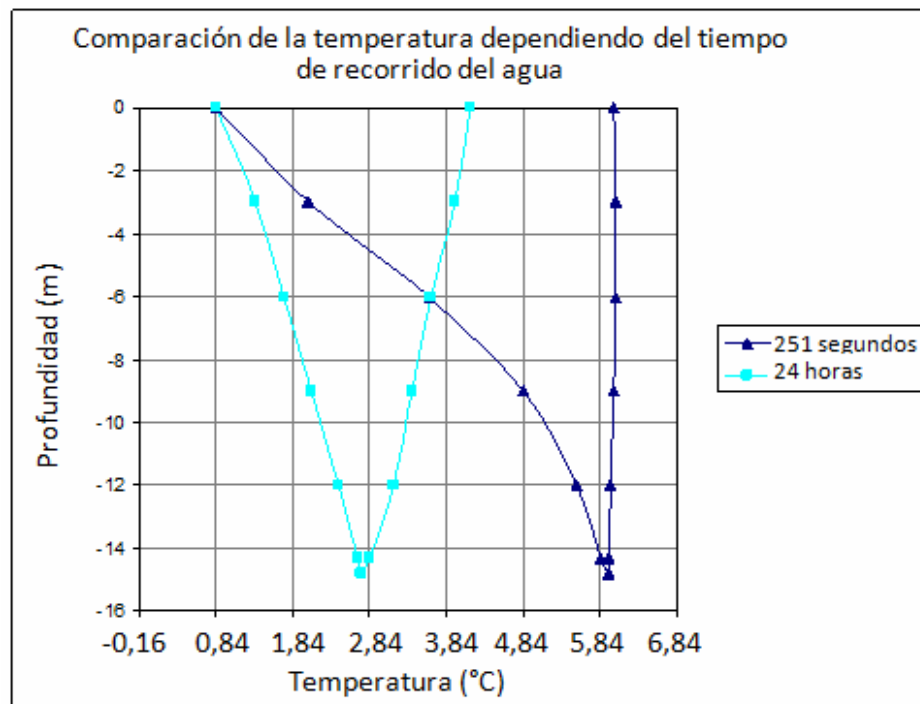


Figura 3.17. Comparación de temperaturas con diferentes periodos de tiempo para el pilote de energía con forma de U.

La figura 3.17 (temperatura Vs. Profundidad) ilustra que ambos casos tienen la misma temperatura de entrada (0,84 °C) y la temperatura más alta alcanzada es obtenida en el periodo más corto (251 segundos) también se puede notar que la diferencia de temperaturas rodean los 2 °C, posiblemente significando que el tiempo tiene que ser cuidadosamente estudiado con la finalidad de optimizar el desempeño

de los pilotes de energía y también es recomendado que el uso de los ciclos sean con el menor periodo de tiempo posible.

Existen otros puntos que se deben examinar para estos modelos, como por ejemplo chequear la distribución de la temperatura del suelo a lo largo del tiempo, debido a esto se muestra los siguientes resultados en la Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20, las cuales fueron ploteadas para un periodo de tiempo de 24 horas (86.400 segundos), y representan la temperatura en contra del tiempo en que se realizó el análisis térmico. Cada línea corresponde a puntos de medición de temperatura localizados en la parte externa izquierda de los pilotes de energía con forma de U y W y en la parte externa derecha para el pilote de energía con forma Coaxial. El eje horizontal de la figuras representa el tiempo en segundos y el eje vertical representa la temperatura en °C.

Los puntos mencionados están ubicados cada 0.5 m desde el concreto con dirección al suelo en el plano horizontal y a unas profundidades de 5 y 12 m. La profundidad de 5 m se puede apreciar en la leyenda con los números de 15, 15 y 10, y la profundidad de 12 m se presenta en la leyenda con valores de 8, 8 y 3 para la figura 3.18, 3.19 y 3.20 respectivamente para ambos casos.

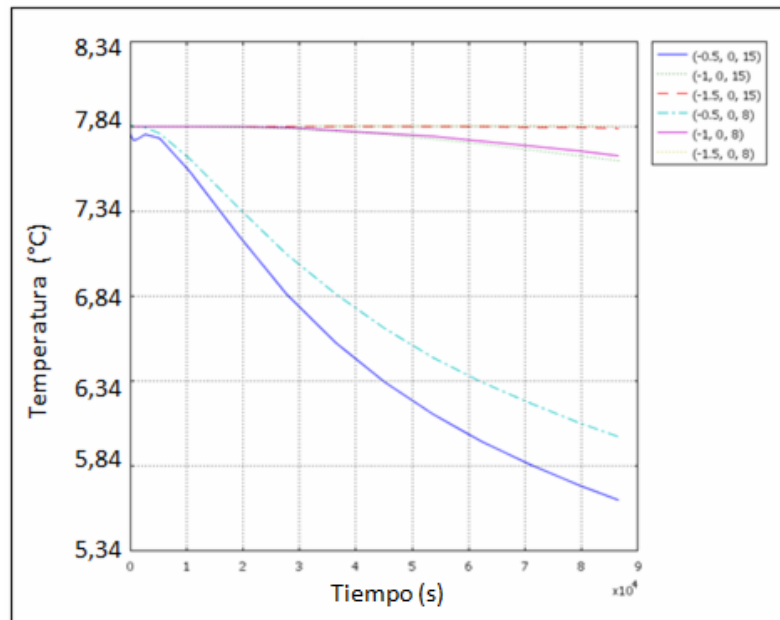


Figura 3.18. Temperatura vs tiempo para el pilote de energía con forma de U.

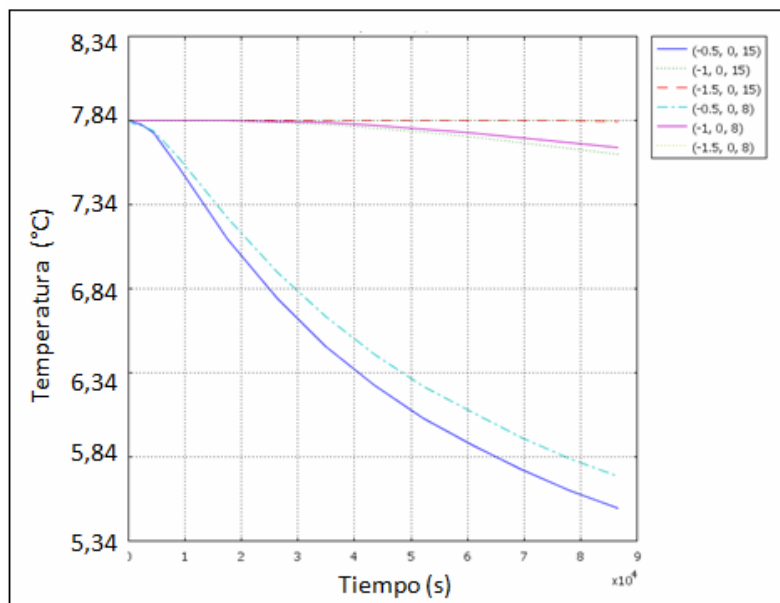


Figura 3.19. Temperatura vs tiempo para el pilote de energía con forma de W.

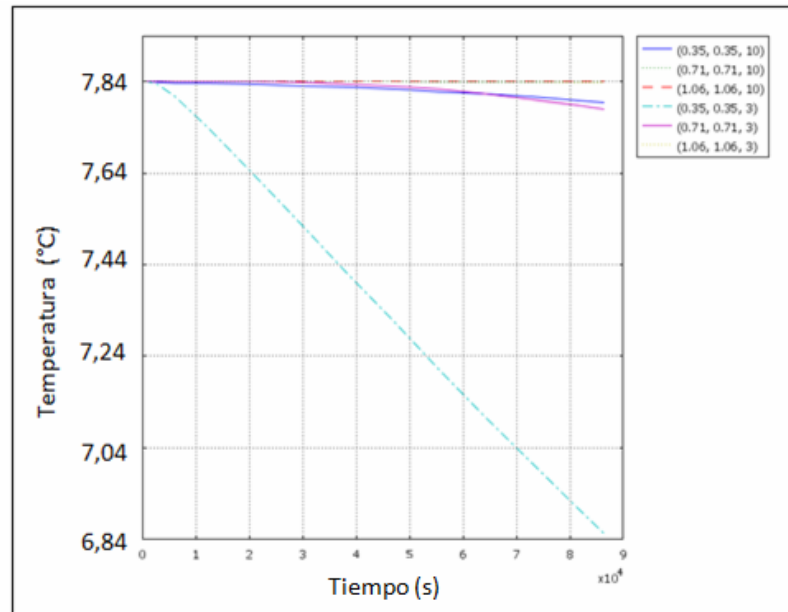


Figura 3.20. Temperatura vs tiempo para el pilote de energía con forma de Coaxial.

De acuerdo a la Figura 3.18 y Figura 3.19 para los pilotes de energía con forma de U y W respectivamente la línea superior (guión y punto) son los puntos del suelo que no son afectados por la extracción de calor en dicho periodo de tiempo. Las líneas entre las superiores e inferiores (sólida y punto) representan el área del suelo que solo cambia su temperatura alrededor de la mitad y un grado de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), y la línea más baja (guión, punto y sólida) representa al punto que es más afectado por la extracción de calor por los canales de agua (más cercanos a la línea de extracción de calor).

Sin embargo, la figura 3.20 para el pilote de energía con forma Coaxial, todas las líneas tienen el mismo comportamiento con la excepción de la que se encuentra entre la superior e inferior (sólida). Este punto no es altamente afectado debido a que a 5 m de profundidad la temperatura del agua es más alta. Sucede lo contrario en los

casos previos (pilotes de energía con forma de U y W). Vale la pena resaltar que la entrada del fluido para este tipo de pilotes de energía se encuentra en la parte inferior.

También es posible apreciar que la línea más baja (sólida, sólida y guión, punto para los con forma de U y W respectivamente) aun mantienen una fuerte pendiente a lo largo del tiempo, representando que un periodo de 24 horas no se ha alcanzado el estado estacionario en dichos modelos.

Otro ejemplo puede ser también apreciado en el punto más cercano de agua (0.5 m del centro) y a 12 m de profundidad para el pilote de energía con forma de U donde se alcanza una temperatura de 6,34 °C en un tiempo de 45.000 segundos (12.5 horas); y para el de forma W en el mismo punto esta temperatura es alcanzada a los 40.000 segundos (11.11 horas). Este es el primer punto que reacciona al proceso de intercambio de calor, los otros dos puntos aun no sienten cambios significativos. Para el de forma de coaxial también se puede hacer la misma analogía, sin embargo este punto es el opuesto debido a que la temperatura de entrada está ubicada en el fondo del pilote, resultando que la temperatura más baja esperada es cercana al fondo del pilote.

3.2.2 Modelado de secciones transversales

Los análisis de secciones transversales son realizados solamente para ecuaciones transitorias para los módulos de convección y conducción, no es necesario acoplar ningún otro módulo. Los valores de entrada son extraídos de los resultados presentados previamente de los modelos longitudinales.

La geometría de las secciones transversales usadas en estos modelos son tomados de la Figura 3.3 con la adición de un suelo que rodea cada pilote con un diámetro de 10 m.

3.2.2.1 Condiciones de borde

Estos modelos han sido dispuestos bajo las condiciones de borde referidas en las Tabla 3.8, Tabla 3.9 y Tabla 3.10, para los pilotes de energía con forma de U, W y coaxial respectivamente, estos valores son extraídos de los resultados del análisis longitudinal a una profundidad de 12m.

Tabla 3.8. Condiciones de borde para los pilotes de energía con forma de U.

| Pilote de energía con forma de U | | |
|---|---------------|--------------|
| Borde | Ajuste | Valor |
| Agua-tubo-Izquierda | Temperatura | 2,44 °C |
| Agua-tubo-Derecha | Temperatura | 3,14 °C |
| Tubos | Continuidad | |
| Pilote | Continuidad | |
| Paredes del suelo | Temperatura | 7,84 °C |

Tabla 3.9. Condiciones de borde para los pilotes de energía con forma de W.

| Pilote de energía con forma de W | | |
|---|---------------|--------------|
| Borde | Ajuste | Valor |
| Agua-tubo-Izquierda | Temperatura | 1,79 °C |
| Agua-tubo-Izquierda centro | Temperatura | 2,04 °C |
| Agua-tubo-Derecha centro | Temperatura | 3,14 °C |
| Agua-tubo-Derecha | Temperatura | 3,34 °C |
| Tubos | Continuidad | |
| Pilote | Continuidad | |
| Paredes del suelo | Temperatura | 7,84 °C |

Tabla 3.10. Condiciones de borde para los pilotes de energía con forma de Coaxial.

| Pilote de energía con forma de Coaxial | | |
|---|---------------|--------------|
| Borde | Ajuste | Valor |
| Agua-tubo | Temperatura | 4,59 °C |
| Tubos | Continuidad | |
| Pilote | Continuidad | |
| Paredes del suelo | Temperatura | 7,84 °C |

3.2.2.2 Condiciones iniciales

Estas condiciones iniciales son iguales para todos los modelos según la Tabla 3.11, representando una muestra de dichos valores.

Tabla 3.11. Muestra de valores iniciales para los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial.

| Muestra de los pilote de energía con forma de U, W y Coaxial | | |
|---|---------------------|--------------|
| Subdominios | Ajuste | Valor |
| Agua Izquierda | Inactivo | |
| Agua Derecha | Inactivo | |
| Tubos | Temperatura Inicial | * |
| Pilote | Temperatura Inicial | 7,84 °C |
| Suelo | Temperatura Inicial | 7,84 °C |

*los valores iniciales de las temperaturas de las tuberías son las mismas, de acuerdo a las condiciones de borde en cada modelo.

3.2.2.3 Ajustes de malla

Se han utilizado mallas tipo libre con forma triangular para todos los modelos, con un número aproximado de 8.500 elementos, esto puede ser visto en la Figura 3.21, Figura 3.22 y Figura 3.23 para los pilotes de energía con forma de U, W y coaxial respectivamente.

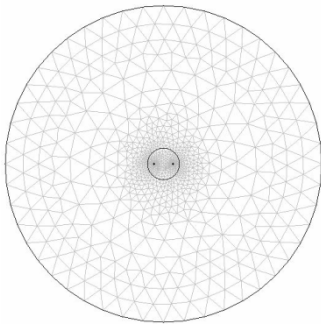


Figura 3.21. Ajuste de malla para el tipo U.

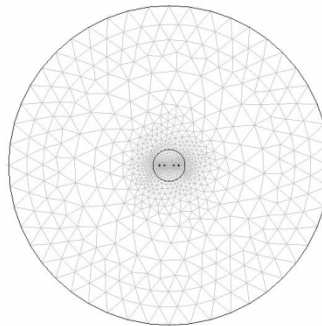


Figura 3.22. Ajuste de malla para el tipo W.

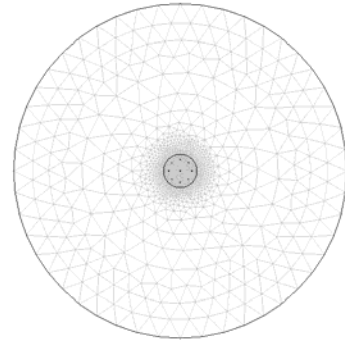


Figura 3.23. Ajuste de malla para el tipo Coaxial

3.2.2.4 Condiciones de tiempo

Los modelos de secciones transversales han sido computados para un periodo de tiempo de 24 horas. Esto es realizado con la finalidad de ver cuánto se afecta el suelo asumiendo este periodo de extracción de calor, sin ningún tipo de recargas y también para mantener la consistencia con el análisis hecho en los modelos longitudinales.

3.2.2.5 Resultados de las secciones transversales

La Figura 3.24, Figura 3.25 y Figura 3.26 ilustran los niveles de temperatura alrededor de cada pilote de energía, luego de un día de extracción de calor del suelo. La Figura 3.29, Figura 2.30 y Figura 3.31 muestran en detalle el intercambio de calor en cada uno de los pilotes. Estas figuras siguen la escala de la barra central.

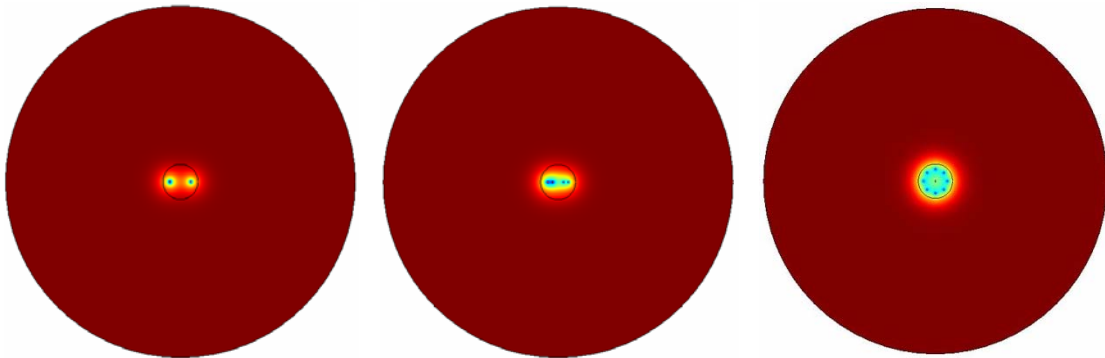


Figura 3.24. Resultado para el de forma de U

Figura 3.25. Resultado para el de forma de W

Figura 3.26. Resultado para el de forma de Coaxial.

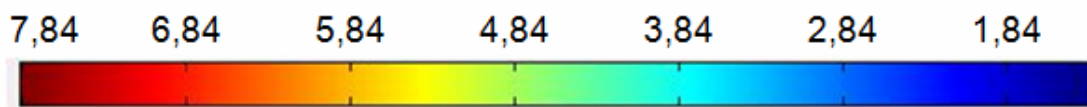
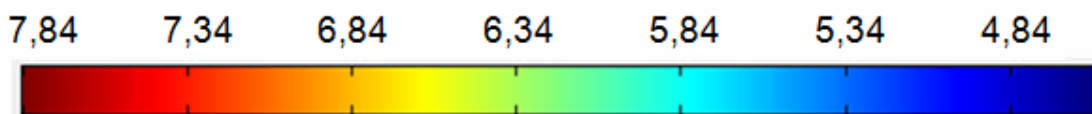


Figura 3.27. Barra de escala para los pilotes tipo U y W en °C.



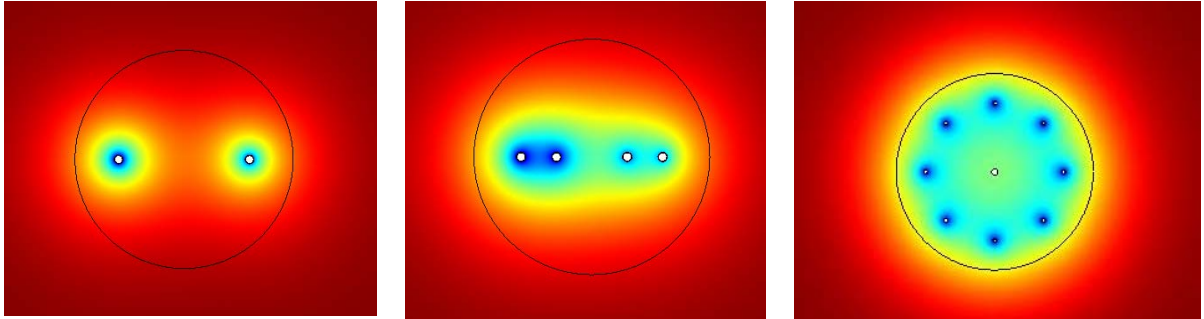


Figura 3.29. Detalle del resultado para el de forma de U.

Figura 3.30. Detalle del resultado para el de forma de W.

Figura 3.31. Detalle del resultado para el de forma de Coaxial.

Figura 3.28. Barra de escala para los pilotes de energía tipo Coaxial en °C

La figura 3.24, figura 3.25 y figura 3.26, ilustran cuanto se afecta el suelo que rodea el pilote por la extracción de calor, debido a que la mayoría de la temperatura del suelo se mantiene a la temperatura inicial de (7,84 °C). El suelo solamente se ve afectado a poco centímetros del pilote, sin embargo estos valores pueden ser mejor apreciados en la Figura 3.29, Figura 3.30 y Figura 3.31. Dichas figuras presentan una perspectiva más interesante en la presente extracción de calor: haciendo más fácil apreciar las temperaturas que rodean cada tubería para cada uno de los arreglos y cuanto los pilotes son afectadas por el intercambio de calor.

Con la finalidad de apreciar el mayor detalle los perfiles de temperatura de los resultados previos se presentan la Figura 3.32, Figura 3.33 y Figura 3.34, correspondientes a los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial respectivamente. Estas figuras muestran las temperaturas a través del modelo,

pasando por el centro de cada tubo. Todos ellos fueron ploteados para un periodo de un día.

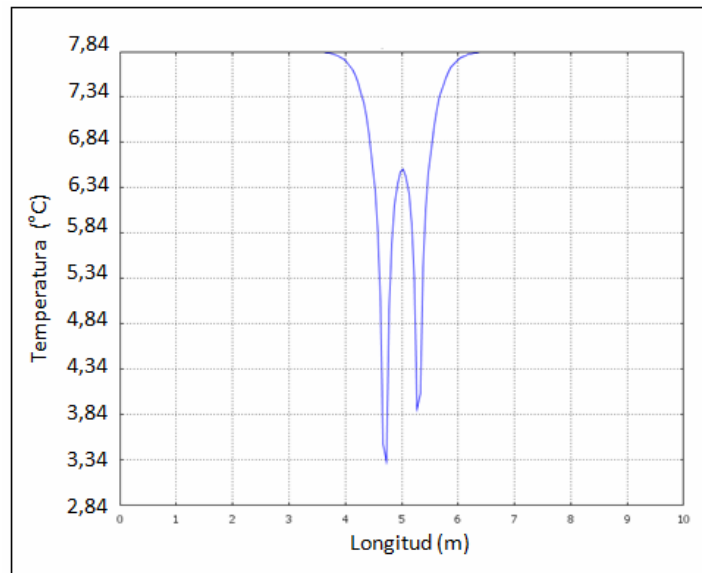


Figura 3.32. Temperatura contra longitud para el pilote de energía tipo U.

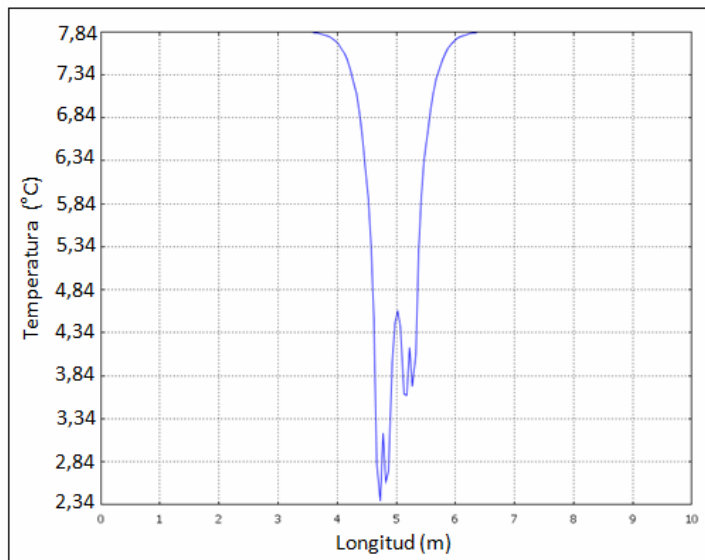


Figura 3.33. Temperatura contra longitud para el pilote de energía tipo W.

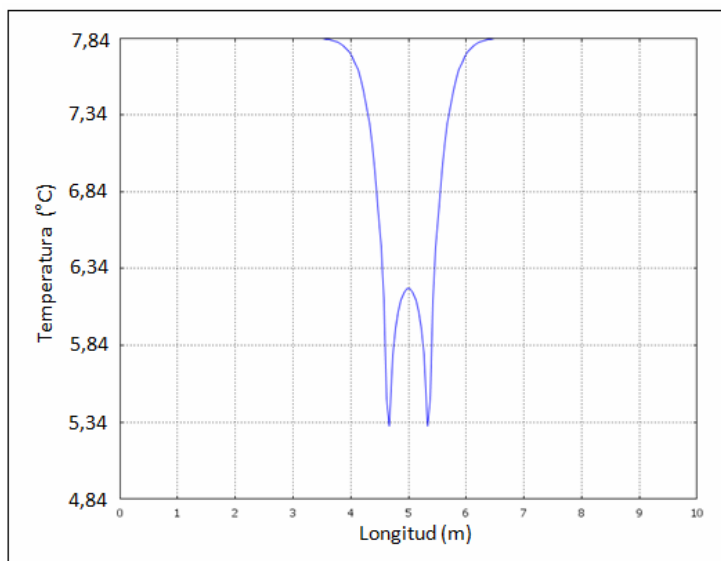


Figura 3.34. Temperatura contra longitud para el pilote de energía tipo Coaxial.

Estas figuras permiten apreciar cuando la temperatura se mantiene constante (27,84 °C) para cada pilote de energía, medido 1.4 m desde el centro del pilote, indicando una vez más cuanto es afectado el suelo por la extracción de calor. También se puede notar que las temperaturas en el centro del pilote no son las mismas para cada modelo, resultando unas temperaturas alrededor de 6,24 °C (forma de U), 4,34 °C (forma W), 6.24 °C (forma Coaxial).

Extrayendo valores de temperatura de los pilotes en los casos previamente presentados (Figura 3.32, Figura 3.33 y Figura 3.34) y valores de temperatura vs el tiempo para todos los pilotes de energía en el análisis longitudinal (Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20 en la sección 3.1.3), es posible ensamblar una comparación de los modelos longitudinales y transversales con la finalidad de chequear la consistencia de dichos resultados. Estos resultados son mostrados en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Comparación de temperatura entre modelos.

| Pilotes de energía | Temperatura de los modelos | |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | Longitudinal (°C)* | Sección transversal (°C) |
| Forma de U | 6,01 | 6,21 |
| Forma de W | 5,72 | 6,09 |
| Forma de Coaxial | 6,85 | 6,60 |

*Valores extraídos a 12 m de profundidad.

La tabla 3.12 presenta los valores de temperatura para los modelos longitudinales y de sección transversal, lo cual resultan con una diferencia de

temperatura alrededor de $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ para cada uno de ellos. También se puede apreciar que las temperaturas en cada modelo (forma de U, W y Coaxial) mantienen una consistencia al apreciar el de forma coaxial con la más alta temperatura en el pilote, seguido por el de forma de U y con la más baja temperatura el pilote de energía con forma W.

Los resultados que presentan dichos valores concuerdan con los valores presentados en la sección 3.2.2.1. Estos modelos confirman que el modelo longitudinal y el de sección transversal tienen una proximidad consistente, validando la posible diferencia de temperatura causada por la integración de las tuberías (polietileno de alta densidad) en los modelos de secciones transversales. Se puede concluir de forma general que el análisis de los modelos longitudinales (tres dimensiones) es muy eficiente. Sin embargo, si es necesario obtener un perfil de temperatura del suelo bien definido, se recomienda usar los modelos de secciones transversales.

Unos de los mejores puntos de comparación de los modelos es la resistencia térmica, cada resistencia es calculada por la Ecuación 7 de la sección 2.2. A continuación, se presentan los resultados de dichos valores, de acuerdo con la configuración de las resistencias en la Figura 3.35.

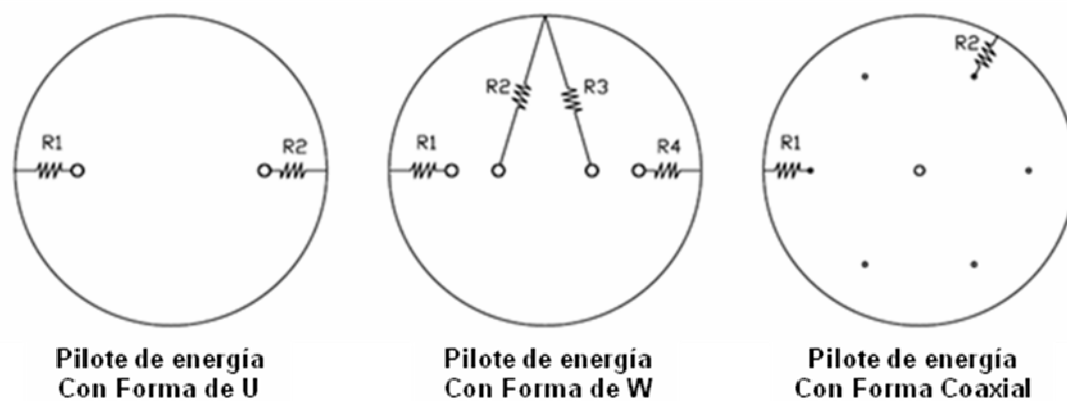


Figura 3.35. Resistencia térmica.

Tabla 3.13 Datos térmicos del pilote de energía con forma de U.

| | Diferencia de Temperatura (°C) | Flujo de Calor Normal (W/m) | Resistencia Térmica (°C/W/m) |
|------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| R1 | 4,74 | 13,18 | 0,360 |
| R2 | 4,04 | 11,39 | 0,355 |
| R promedio | 4,39 | 24,57 | 0,179 |

Tabla 3.14. Datos térmicos del pilote de energía con forma de W.

| Diferencia de Temperatura (°C) | Flujo de Calor Normal (W/m) | Resistencia Térmica (°C/W/m) |
|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | | |

| | | | |
|------------|------|-------|-------|
| R1 | 5,10 | 11,02 | 0,463 |
| R2 | 4,85 | 8,90 | 0,545 |
| R3 | 3,75 | 6,70 | 0,560 |
| R4 | 3,55 | 7,62 | 0,466 |
| R promedio | 4,31 | 34,23 | 0,126 |

Tabla 3.15. Datos térmicos del pilote de energía con forma de Coaxial.

| | Diferencia de Temperatura (°C) | Flujo de Calor Normal (W/m) | Resistencia Térmica (°C/W/m) |
|------------|---|--|---|
| R1, R2 | 2,05 | 4,27 | 0,481 |
| R promedio | 2,05 | 34,18 | 0,060 |

Para el cálculo de la resistencia térmica se usó un valor promedio de temperatura correspondiente al perímetro de los pilotes. Este valor menos la temperatura de la condición de borde suelo–concreto representan la diferencia de temperatura para cada uno de los pilotes de energía. La Ecuación 7 fué utilizada para calcular la resistencia térmica mostrada en la última columna de las Tabla 3.13, Tabla 3.14 y Tabla 3.15.

La suma del flujo de calor a través de cada tubo es usada junto con el promedio de la temperatura de las tuberías con la finalidad de obtener el valor promedio de la resistencia térmica (R promedio), la cual fué extraída de las simulaciones al usar la herramienta de integración de borde del programa COMSOL Multiphysics.

Bajo los fundamentando de la teoría, la resistencia más baja representa el mejor desempeño térmico, lo cual indica que el mejor pilote de energía es el de forma Coaxial, seguido por el de forma de W y por último el de forma de U. Estos

resultados son consistentes con los mostrados en el fundamento teórico (por Gao et al) en la sección 1.5 al obtener la misma conclusión, que entre los pilotes de energía tipo U y W, el pilote de energía con forma W es el más eficiente al tener la menor resistencia térmica.

3.2.3 Modelados y resultado de secciones transversales en grupo

Estos modelos tienen la intención de chequear el comportamiento térmico de los pilotes de energía cuando son colocados en grupo, esto es simulado para un análisis transitorio en un periodo de seis meses de calentamiento y un periodo de tiempo de seis meses de enfriamiento.

Para el periodo de enfriamiento es asumida una temperatura de fluido descendente y ascendente con unas temperaturas de 9,84 y 8,84 °C respectivamente. Los resultados de las temperaturas del periodo de calentamiento son ubicados como valores iniciales de temperatura para el análisis del periodo de enfriamiento. Este tipo de ensayo permite el estudio del comportamiento térmico en una fundación típica completa (usando todos los pilotes como intercambiadores de calor). Este modelo es estructurado con cinco pilotes de energía con formas de U dispuestos con las mismas condiciones de subdominios y condiciones de borde dadas en los modelos de secciones transversales (sección 3.2.3). Con la excepción que las temperaturas de los fluidos descendente y ascendente son asumidas para el periodo de enfriamiento como se menciono anteriormente.

3.2.3.1 Geometría y arreglos de malla.

La Figura 3.3 ilustra las dimensiones de los pilotes de energía con forma de U, utilizados en estos modelos y la Figura 3.36 muestra la distancia entre cada pilote de

energía. Todos ellos están separados a 5 metros desde el pilote de energía central y el suelo tiene unas dimensiones de 14.8 metros por cada lado.

La malla libre fué utilizada para todos estos modelos, como se ilustra en la siguiente Figura 3.37. Esta malla tiene una cantidad aproximada de 18.000 elementos.

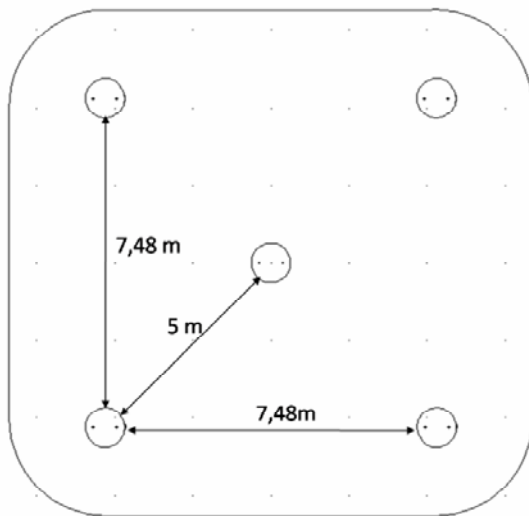


Figura 3.36. Geometría del modelo pilotes de energía en grupo.

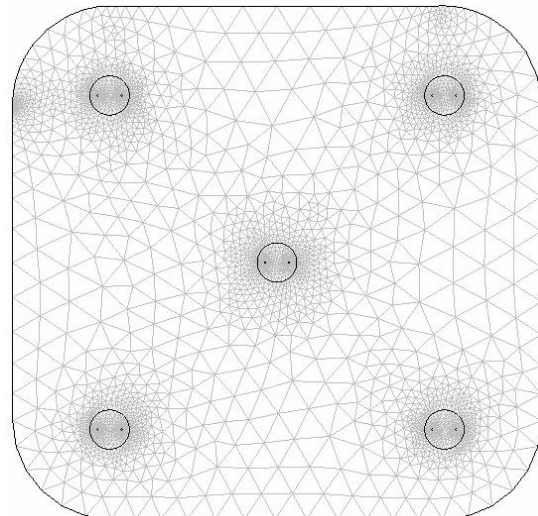


Figura 3.37. Malla del modelo pilotes de energía en grupo.

3.2.3.2 Resultados

Las siguientes Figura 3.38 y Figura 3.39 muestran los resultados de seis meses de calentamiento (Extracción de calor) y enfriamiento (Inyección de calor) respectivamente.

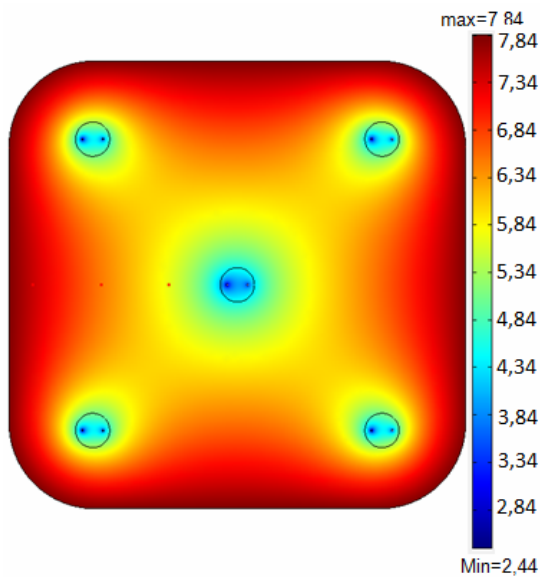


Figura 3.38. Resultado de la extracción de calor con pilotes de energía arreglado en grupo ($^{\circ}\text{C}$).

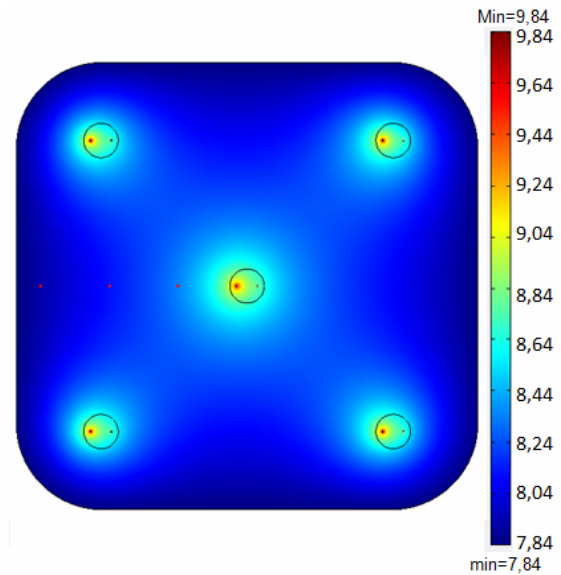


Figura 3.39. Resultado de la Inyección de calor con pilotes de energía arreglado en grupo ($^{\circ}\text{C}$).

La Figura 3.40 y Figura 3.41 ilustran el comportamiento de la temperatura a lo largo de los doce meses al mostrar los primeros seis meses de extracción de calor (izquierda) y de segundo los seis meses de inyección de calor (derecha). Cada línea corresponde a los puntos rojos ubicados en la figura superior (Figura 3.38 y Figura 3.39) localizados cada 2 m desde el centro del modelo hacia la pared izquierda del suelo.

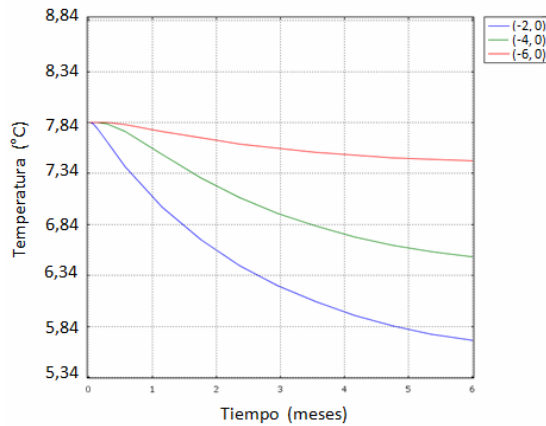


Figura 3.40. Perfil de temperatura del suelo durante el calentamiento.

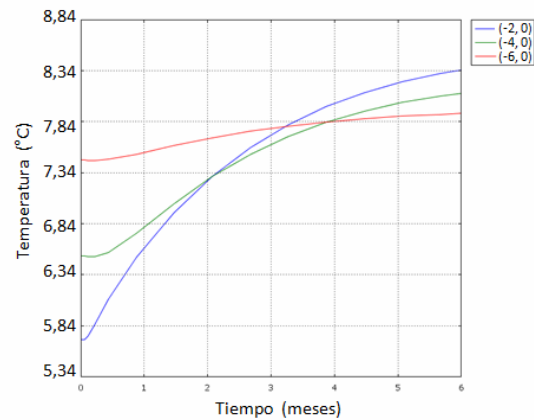


Figura 3.41. Perfil de temperatura del suelo durante el enfriamiento.

El perfil presentado a la izquierda (temperatura vs. tiempo) toda las líneas son originadas de un mismo valor inicial (7,84 °C) como se muestra en la Figura 3.40, seguido por el decrecimiento de la temperatura debido a la influencia de la extracción de calor. Más adelante los resultados de la temporada de calentamiento es propuesta como valores iniciales para la temporada de enfriamiento, como es posible apreciarlo en la figura 3.41, donde se observa que sus temperaturas se incrementan debido a la inyección de calor en el suelo por parte de los pilotes de energía; resultando los valores finales del periodo de inyección de calor en un rango de temperatura entre 7,84 y 8,34 °C.

Analizando los resultados podemos notar claramente que el punto más cercano a la extracción o inyección de calor (línea azul) es aquel que sufre mayores cambios de temperatura y siente los efectos con mayor rapidez que los demás puntos, en contraste con el punto ubicado más alejado de los pilotes de energía (línea roja).

Estos resultados pueden ser predecibles y podrían ser calculados de una forma sencilla, sin embargo; esto ilustra cómo se vería la distribución de temperatura en el suelo que rodea a las fundaciones del edificio. Los valores resultantes de tal estudio serían de gran interés si el pilote de energía se ubicara de una forma asimétrica.

Vale la pena mencionar, que los niveles de temperatura durante el periodo de enfriamiento alcanzan un mayor valor a aquellos presentes en el periodo de calentamiento. Esto significa una gran recuperación o hasta un mejoramiento de condiciones iniciales para el siguiente invierno al volver a iniciar el periodo de calentamiento. Este escenario puede mejorar al presentarse el caso de que la inyección de temperatura en el modelo haya sido mayor.

Es recomendable el uso de este modelo para examinar con mayor profundidad cuanta energía es posible almacenar en un tipo de suelo, cuanta energía es extraída o inyectada y cuanto tiempo toma recargar el suelo. Modelos de este tipo permiten procesar diferentes tipos de geometrías y características que pueden ser evaluadas hasta que el resultado alcance al punto más alto de eficiencia.

3.5 Análisis estructural

3.5.1 Capacidad estática del pilote

La capacidad estática de carga de un pilote puede ser analógicamente analizada al usar términos constantes y valores porcentuales con la finalidad de definir cuanto se reduce la capacidad de carga debido a la colocación de las tuberías dentro de la estructura del pilote.

De acuerdo a la Ecuación 5, el único valor que produce cambios en los resultados es el área de la sección transversal, como se menciona en la sección 1.3,

este multiplica la capacidad de carga debido al trabajo de punta “Ppu”, que para este caso de los pilotes de energía reduce el valor total de la resistencia de carga. Sin embargo, para procesar esta ecuación a través por medio de una analogía de porcentajes es necesario tomar en cuenta algunas asunciones básicas:

- La comparación es hecha usando el total de las áreas transversales de un pilote típico y el porcentaje de área de la sección transversal correspondiente a cada pilote de energía.
- Los diámetros de los pilotes usados son 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 m para este análisis.
- Las dimensiones de los tubos en detalle como los describe la figura 3.5 (en mm) son:

Tubos de polietileno de alta densidad utilizados en los pilotes de energía con forma de U y W tienen un diámetro externo de 40 mm.

Tubos de polietileno de alta densidad utilizados en los pilotes de energía con forma Coaxial en la parte exterior tienen un diámetro externo de 16 mm y el tubo central tiene un diámetro exterior de 32 mm.

- Existen dos escenarios principales en análisis para cada valor del término Ppu (A):

El término equivale al 50% de la capacidad estática del pilote.

El término equivale al 100% de la capacidad estática del pilote, el caso más desfavorable.

3.5.1.1 Resultados

Las siguiente Figura 3.42, Figura 3.43, Figura 3.44 y Figura 3.45 representan los valores totales de reducción de la capacidad estática de carga para cada diámetro de pilote y para cada tipo de pilote de energía debido a la reducción del área transversal.

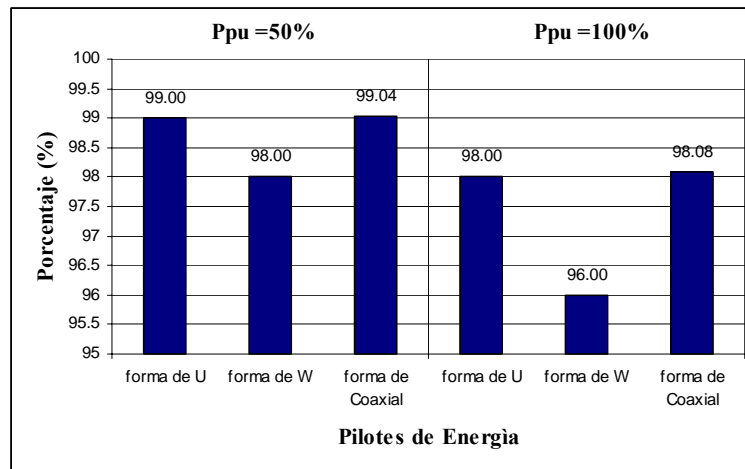


Figura 3.42. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 0.4 m de diámetro.

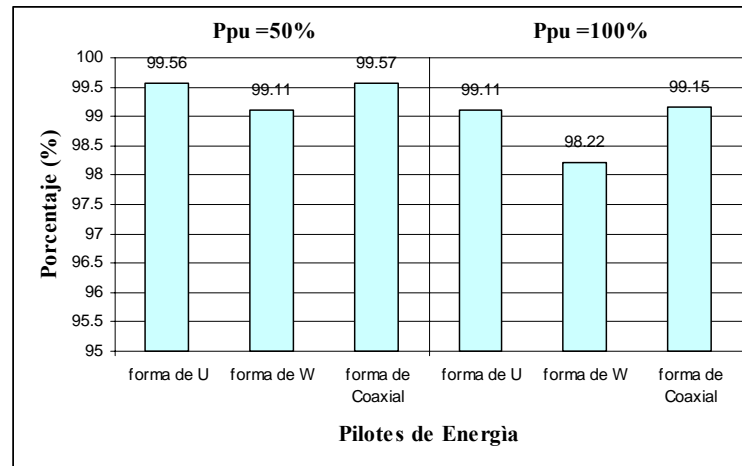


Figura 3.43. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 0.6 m de diámetro.

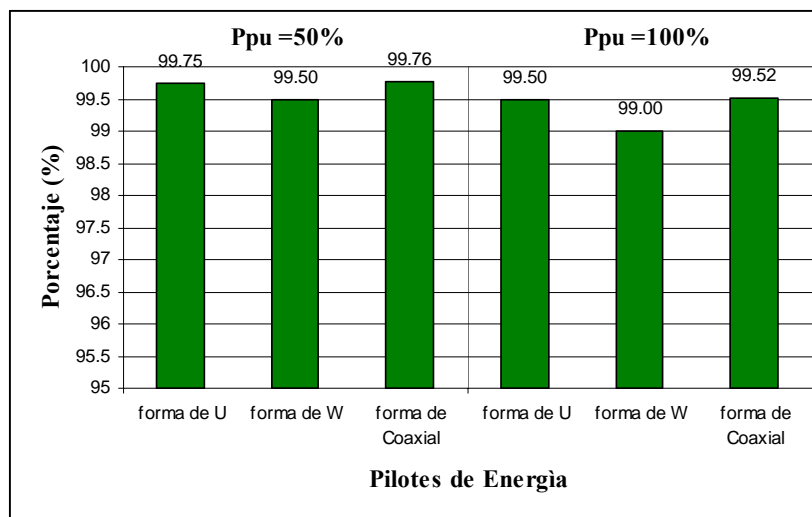


Figura 3.44. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 0.8 m de diámetro.

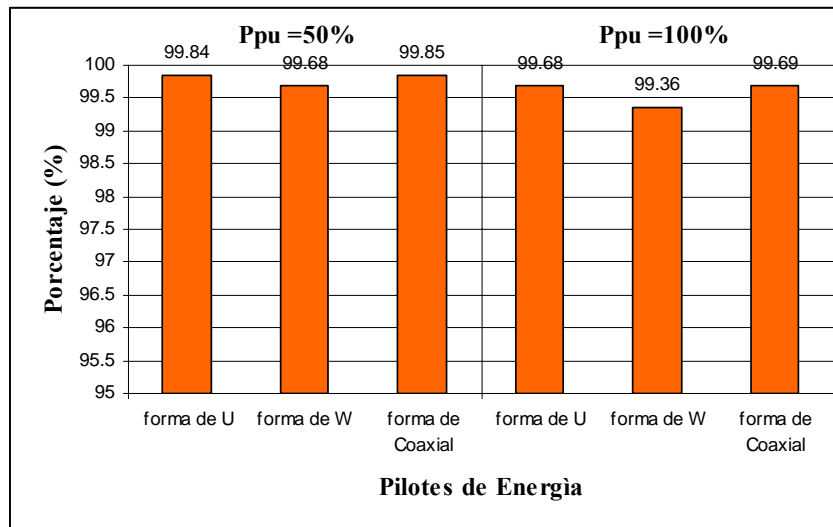


Figura 3.45. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 1.0 m de diámetro

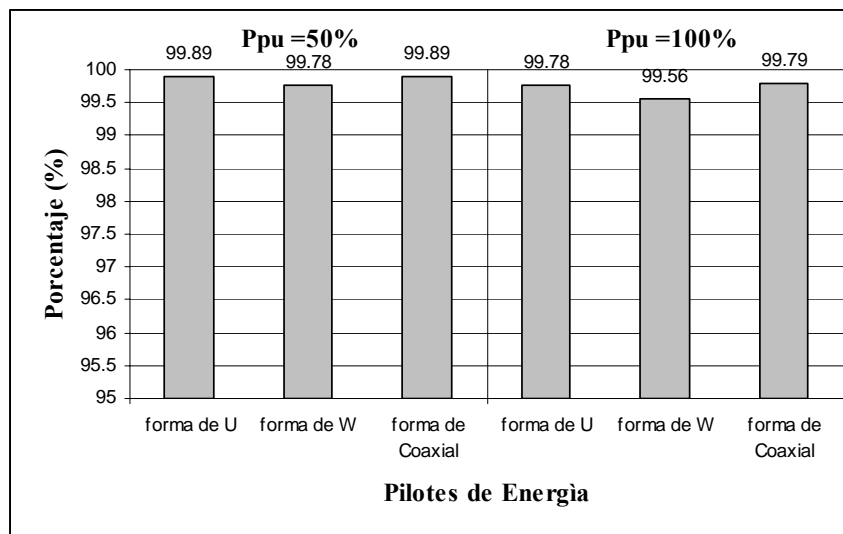


Figura 3.46. Reducción de capacidad de carga para pilotes de 1.2 m de diámetro

Las gráficas de barra previamente mostradas obtienen su fuente en los valores mostrados en el apéndice estructural en el capítulo 5.

Las gráficas de barras presentadas previamente demuestran valores de porcentaje que favorecen al uso de los pilotes de energía ya que los valores que se manejan son muy bajos. A su vez facilitan el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes de energía al tan solo multiplicar el valor obtenido por medio de métodos regulares por este valor aquí presentado, lo cual resultara la capacidad de carga disminuida con respecto al diámetro y el tipo de pilote de energía utilizado.

Comentario: Existe como se ilustra en el capítulo 2, pilotes de energía que poseen mayor cantidad de tubos, el cual incrementa la reducción de la capacidad de carga del pilote; Los valores presentados previamente solo son aplicable para los pilotes de energía estudiados en este proyecto.

Con la finalidad de identificar la tendencia de la reducción de la capacidad de carga en porcentaje de los pilotes de energía con respecto a sus diámetros, se analizarán los siguientes casos ilustrados en la figura 3.47, figura 3.48 y figura 3.49, representado por el pilote de energía con forma de U, W y Coaxial respectivamente.

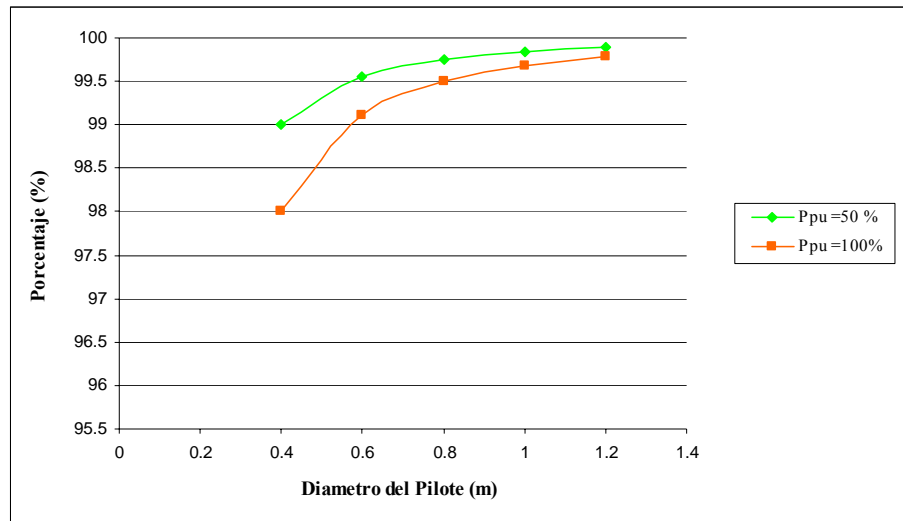


Figura 3.47. Tendencia de la reducción de carga para el pilote de energía tipo U

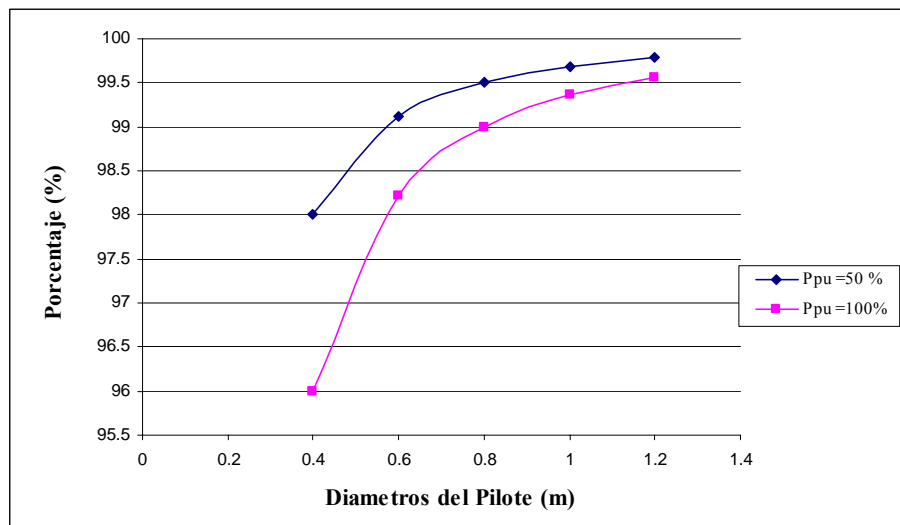


Figura 3.48. Tendencia de la reducción de carga para el pilote de energía tipo W

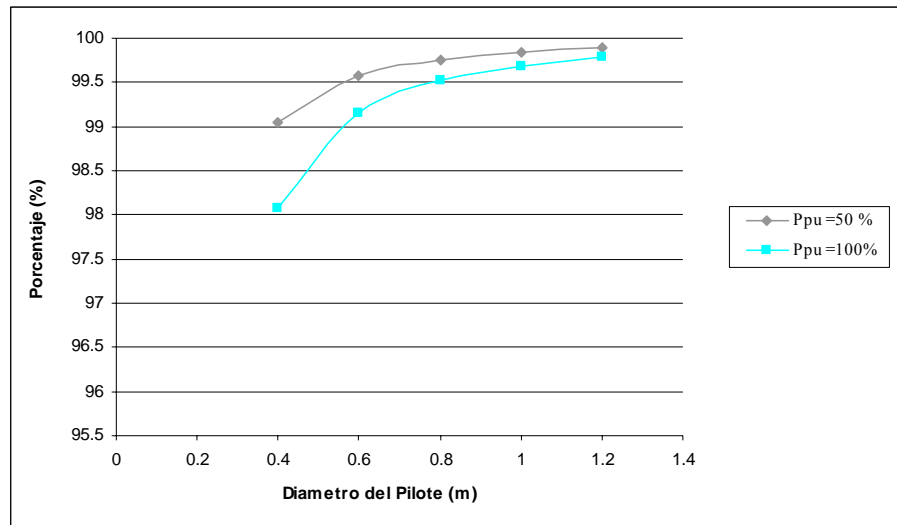


Figura 3.49. Tendencia de la reducción de carga para el pilote de energía tipo Coaxial

La figura 3.47, figura 3.48 y Figura 3.49 obtiene sus valores de origen en las tabla 5.6, tabla 5.7 y tabla 5.8 respectivamente presentada en el apéndice estructural.

Estas gráficas representan la mejor forma de visualizar como disminuye la reducción de la capacidad de carga de los pilotes de energía debido al aumento de los diámetros del pilote como era esperado i.e.: a mayor diámetro del pilote la capacidad de carga del pilote de energía se encuentra menormente afectada por la adición de las tuberías. También se demuestra que al tener un pilote de energía solo trabajando por resistencia de punta disminuye de mayor forma los porcentajes de capacidad de carga total, esto se puede apreciar en cualquiera de los tres casos, al notar que la línea correspondiente al Ppu= 100 % se encuentra por debajo a la correspondiente al Ppu= 50%.

Como se puede apreciar en la figura 3.48 la reducción de la carga solo varía en un cuatro por ciento en el caso más desfavorable, representado valores despreciables

al momento de diseñar usando factores de seguridad dando otro motivo para que confiar el uso de los pilotes de energía.

3.5.2 Modelos estructurales de los pilotes de energía

El modelado de los pilotes de energía será hecho por medio del software SAP2000 v11. Estos resultados obtenidos serán comparados con los pilotes típicos calculados en el mismo programa bajo las mismas condiciones. El objetivo de esta simulación es definir si existe diferencia entre las deformaciones que sufren los pilotes energía y los pilotes convencionales. A continuación se explicara paso a paso el procedimiento necesario para el diseño de un pilote típico y un pilote de energía.

Los pilotes que van a ser evaluados en esta sección tendrán diámetros comprendidos de 0,4 m hasta 1,2 m, con frecuencias de cada 0,2 m, tanto para los pilotes convencionales como para los pilotes de energía.

Es importante mencionar que para la evaluación de todos estos modelos tanto convencional como los pilotes de energía, se asume que no existe asentamiento en el suelo, lo cual nos permite tener certeza al medir las deformaciones axiales de los pilotes simulados.

3.5.2.1 Diseño de los pilotes convencionales

Para iniciar el proceso de diseño usando este programa, es necesario definir una cuadrícula en la cual se trabajará el modelo del pilote, esta cuadrícula en conveniencias personal cumple con las dimensiones de 2m, 2m y 15m en las direcciones X, Y y Z respectivamente.

Previo a realizar el trazado que identificará el pilote, es necesario definir su sección transversal de acuerdo a las propiedades tales como: Tipo de material, forma

y dimensiones de la sección transversal, tipo de elemento, cantidad de recubrimiento para la barra de acero confinada y la selección de chequeo o diseño del acero de refuerzo. La siguiente tabla 3.16 muestra los arreglos utilizados en los puntos mencionados previamente.

Tabla 3.16. Propiedades de la sección transversal.

| | Material | Geometría del Pilote | Diámetro (m) | Tipo de Elemento | Recubrimiento (m) |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| PILOTE 1 | Concreto Armado | Circular | 0,4 | Columna | 0,04 |
| PILOTE 2 | Concreto Armado | Circular | 0,6 | Columna | 0,055 |
| PILOTE 3 | Concreto Armado | Circular | 0,8 | Columna | 0,07 |
| PILOTE 4 | Concreto Armado | Circular | 1,0 | Columna | 0,09 |
| PILOTE 5 | Concreto Armado | Circular | 1,2 | Columna | 0,1 |

Comentario: Los pilotes convencionales serán identificados de acuerdo a lo establecido en la tabla anterior.

Luego de que todos estos datos fueron establecidos es necesario trazar una línea a través de la cuadrícula la cual permitirá definir la longitud del elemento (15 m) y proporcionara todas sus propiedades.

El resto de los parámetros previos al análisis estructural son definidos por las cargas a utilizar para cada tipo de pilote y el tipo de confinamiento en la punta del pilote. Para estas simulaciones se utilizo una restricción en la punta inferior del modelo de desplazamiento en las direcciones X, Y y Z como también restricción de rotación en cualquier sentido. A continuación se ilustra la tabla 18 que muestra los valores de cargas utilizadas para cada pilote simulado.

Tabla 3.17. Cargas utilizadas en cada modelo.

| | DIÁMETROS (m) | CARGA (Kgf) |
|----------|--------------------------|------------------------|
| PILOTE 1 | 0,4 | 14000 |
| PILOTE 2 | 0,6 | 21000 |
| PILOTE 3 | 0,8 | 28000 |
| PILOTE 4 | 1,0 | 35000 |
| PILOTE 5 | 1,2 | 42000 |

La figura 3.50 presentada a continuación permite apreciar los elementos mencionados anteriormente utilizados en el software SAP2000, de los cuales la cuadrícula, el empotramiento en la parte inferior, el sistema de coordenadas y la línea que representa el pilote se mantienen constantes para todos los casos. Sin embargo la carga presentada en esta imagen corresponde al pilote de 0,6 m de diámetro.

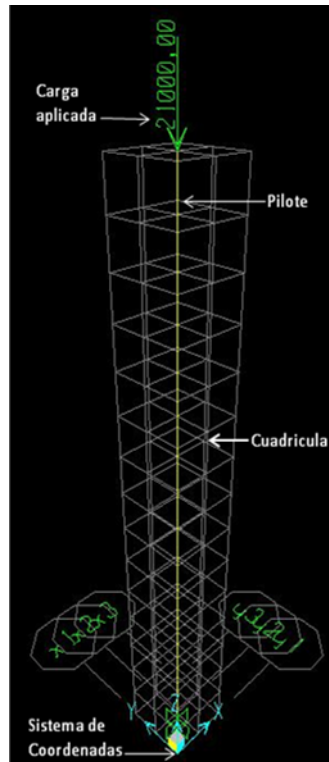


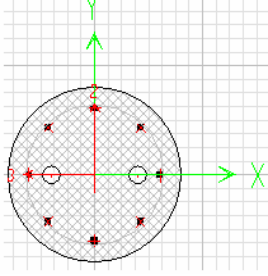
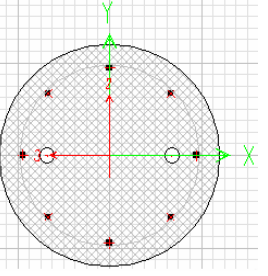
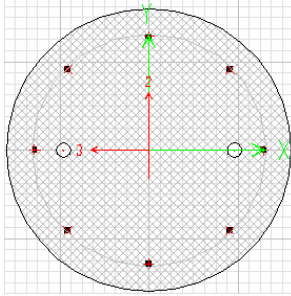
Figura 3.50. Ejemplo de modelo en el programa Sap2000

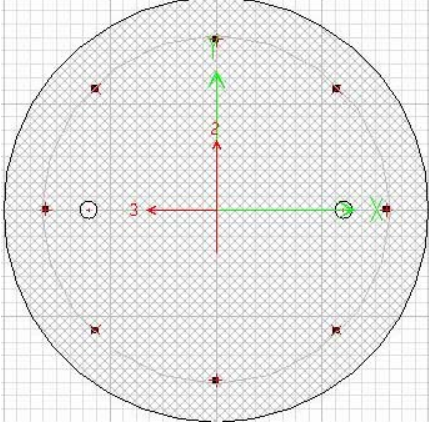
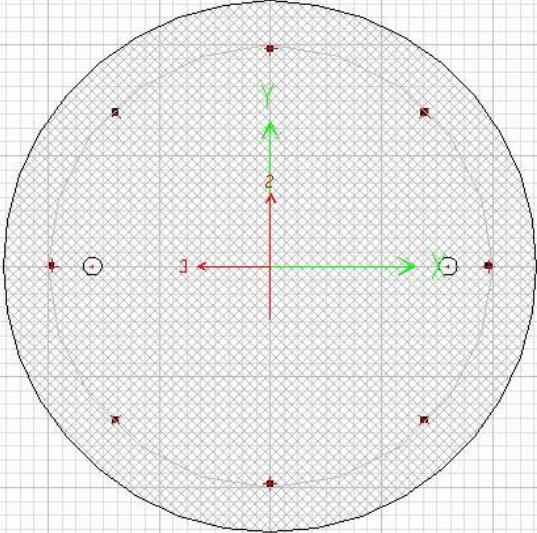
3.5.2.2 Diseño de los pilotes de energía

El procedimiento para el diseño de los pilotes de energía, es muy similar al diseño de los pilotes convencionales. Estos modelos requieren el mismo tipo de cuadrícula, línea de geometría, tipo de restricción, y las mismas cargas aplicadas de acuerdo a cada diámetro. Sin embargo antes de crear la línea que representara al pilote es necesario definir la sección transversal de cada pilote de energía.

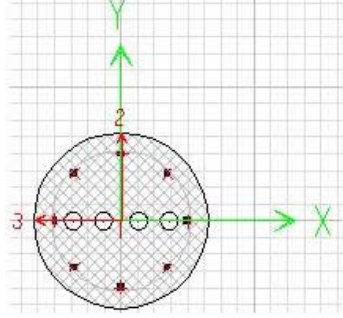
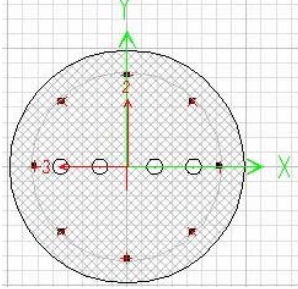
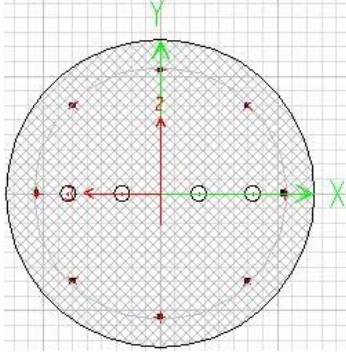
Estos pilotes corresponden a las secciones transversales de los pilotes de energía con forma de U, W y Coaxial los cuales a continuación se presentara la geometría específica de cada uno de ellos con respecto a su diámetro.

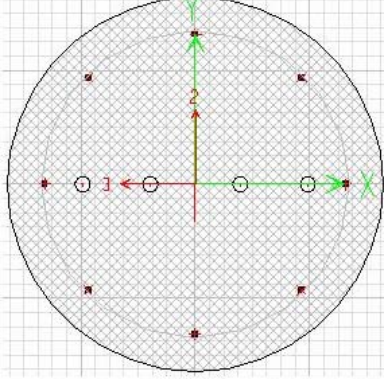
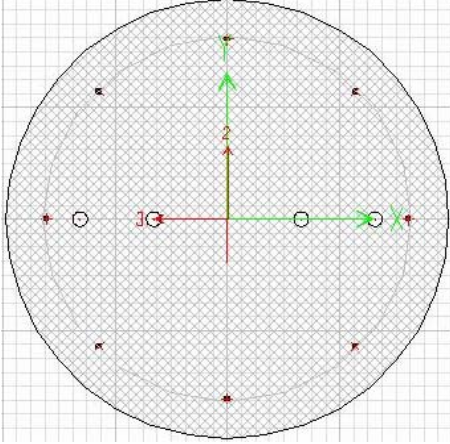
Pilotes de energía tipo U.

| Descripción. | Geometría |
|--|--|
| <p>Diámetro de 0,40 m; utiliza un par de tubos de 0,04 m de diámetro; con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,04 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,08 m.</p> |  <p>Figura 3.51. Pilote de energía tipo U de 0,4 m de diámetro</p> |
| <p>Diámetro de 0,60 m; utiliza un par de tubos de 0,04 m de diámetro; con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,055 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,11 m.</p> |  <p>Figura 3.52. Pilote de energía tipo U de 0,6 m de diámetro</p> |
| <p>Diámetro de 0,80 m; utiliza un par de tubos de 0,04 m de diámetro; con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,07 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,14 m.</p> |  |

| | |
|---|--|
| | <p>Figura 3.53. Pilote de energía tipo U de 0,8 m de diámetro</p> |
| <p>Diámetro de 1,00 m; utiliza un par de tubos de 0,04 m de diámetro; con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,09 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,18 m.</p> |  <p>Figura 3.54. Pilote de energía tipo U de 1,0 m de diámetro</p> |
| <p>Diámetro de 1,20 m, utiliza un par de tubos de 0,04 m de diámetro, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,10 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,18 m.</p> |  <p>Figura 3.55. Pilote de energía tipo U de 1,2 m de diámetro</p> |

Pilotes de energía tipo W.

| Descripción. | Geometría |
|---|---|
| <p>Diámetro de 0,40 m, utiliza dos pares de tubos de 0,04 m de diámetro, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,04 m, tiene una separación entre tubo exterior e interior de 0,07 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,07 m.</p> |  <p>Figura 3.56. Pilote de energía tipo W de 0,4 m de diámetro</p> |
| <p>Diámetro de 0,60 m, utiliza dos pares de tubos de 0,04 m de diámetro, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,055 m, tiene una separación entre tubo exterior e interior de 0,10 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,11 m</p> |  <p>Figura 3.57. Pilote de energía tipo W de 0,6 m de diámetro</p> |
| <p>Diámetro de 0,80 m, utiliza dos pares de tubos de 0,04 m de diámetro, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,07 m, tiene una separación entre tubo exterior e interior de 0,14 m, la distancia entre los tubos y</p> |  |

| | |
|---|--|
| la pared externa del pilote es de 0,14 m | Figura 3.58. Pilote de energía tipo W de 0,8 m de diámetro |
| Diámetro de 1,00 m, utiliza dos pares de tubos de 0,04 m de diámetro, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,09 m, tiene una separación entre tubo exterior e interior de 0,18 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,18 m |  <p data-bbox="870 856 1386 947">Figura 3.59. Pilote de energía tipo W de 1,0 m de diámetro</p> |
| Diámetro de 1,20 m, utiliza dos pares de tubos de 0,04 m de diámetro, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,10 m, tiene una separación entre tubo exterior e interior de 0,20 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,18 m |  <p data-bbox="870 1470 1386 1560">Figura 3.60. Pilote de energía tipo W de 1,2 m de diámetro</p> |

Pilotes tipo Coaxial.

| Descripción. | Geometría |
|--------------|-----------|
|--------------|-----------|

Diámetro de 0,40 m, utiliza 8 tubos en la parte exterior y uno en el centro con diámetros de 0,016 m y 0,032 m respectivamente, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,04 m, tiene una separación de centro a centro del tubo exterior al interior de 0,11 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,082 m

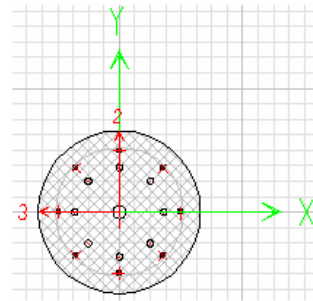


Figura 3.61. Pilote de energía tipo Coaxial de 0,4 m de diámetro

Diámetro de 0,60 m, utiliza 8 tubos en la parte exterior y uno en el centro con diámetros de 0,016 m y 0,032 m respectivamente, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,055 m, tiene una separación de centro a centro del tubo exterior al interior de 0,18 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,112 m

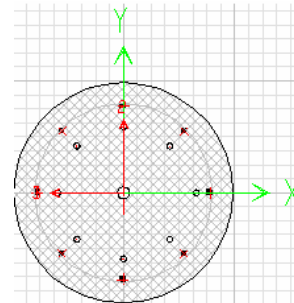


Figura 3.62. Pilote de energía tipo Coaxial de 0,6 m de diámetro

Diámetro de 0,80 m, utiliza 8 tubos en la parte exterior y uno en el centro con diámetros de 0,016 m y 0,032 m respectivamente, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,07 m, tiene una separación de centro a centro del tubo exterior al interior de 0,25 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,142 m

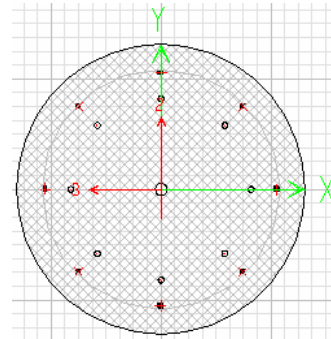


Figura 3.63. Pilote de energía tipo Coaxial de 0,8 m de diámetro

Diámetro de 1,00 m, utiliza 8 tubos en la parte exterior y uno en el centro con diámetros de 0,016 m y 0,032 m respectivamente, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,09 m, tiene una separación de centro a centro del tubo exterior al interior de 0,31 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,182 m

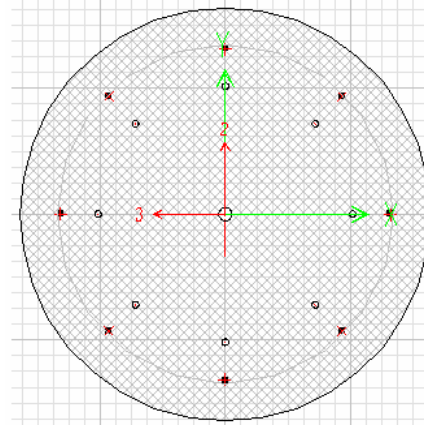


Figura 3.64. Pilote de energía tipo Coaxial de 1,0 m de diámetro

Diámetro de 1,20 m, utiliza 8 tubos en la parte exterior y uno en el centro con diámetros de 0,016 m y 0,032 m respectivamente, con fines de representación del recubrimiento se colocaron 8 barras #5 como refuerzo con un recubrimiento de 0,10 m, tiene una separación de centro a centro del tubo exterior al interior de 0,41 m, la distancia entre los tubos y la pared externa del pilote es de 0,182 m

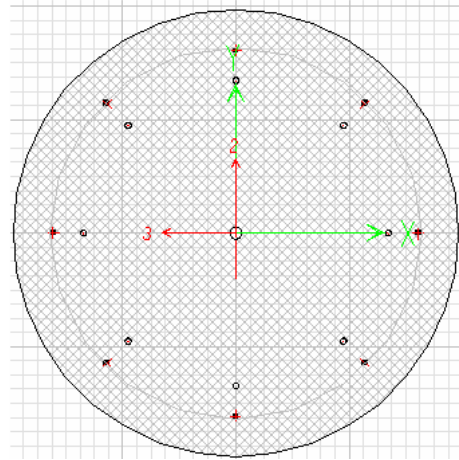


Figura 3.65. Pilote de energía tipo Coaxial de 1,2 m de diámetro

3.5.2.3 Resultados

En esta sección se presentaran los resultados por los análisis obtenidos para el diseño de los pilotes convencionales y pilotes de energía. Permitiendo comparar la deformación axial que sufrieron los pilotes convencionales versus la deformación axial para los pilotes de energía.

A continuación se presenta una serie de gráficas de barras que corresponden a la deformación axial que sufrió cada tipo de pilote en la dirección Z negativo para los diámetros mostrados previamente (0,4m; 0,6m; 0,8m; 1,0m; 1,2m). Estos valores presentados cuantifican el desplazamiento del nodo superior de los pilotes en dirección Z negativo desde un punto inicial con un desplazamiento de cero metros hasta su valor final dictado por la deformación debido a la carga aplicada.

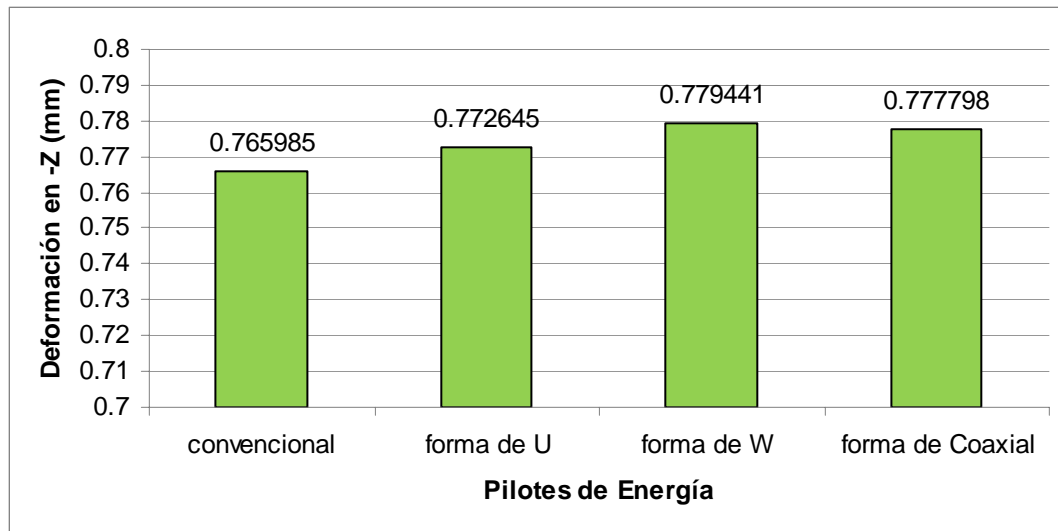


Figura 3.66. Deformación axial para los pilotes de 0,4 m de diámetro.

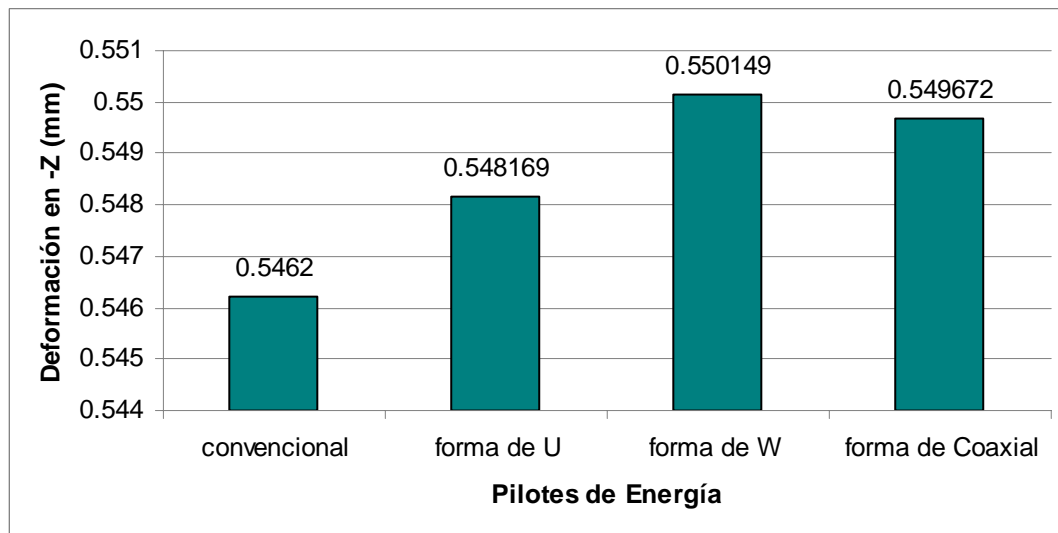


Figura 3.67. Deformación axial para los pilotes de 0,6 m de diámetro

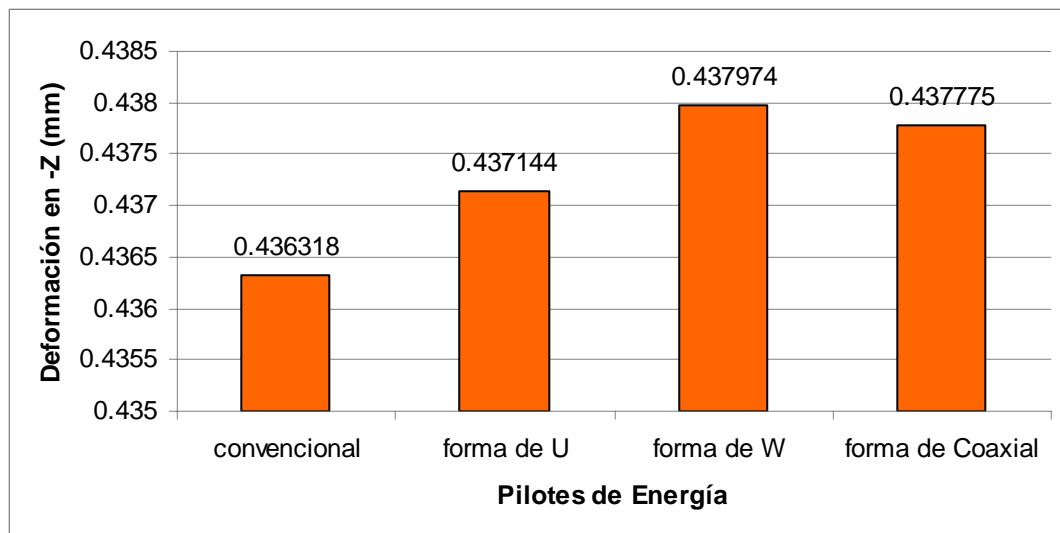


Figura 3.68. Deformación axial para los pilotes de 0,8 m de diámetro

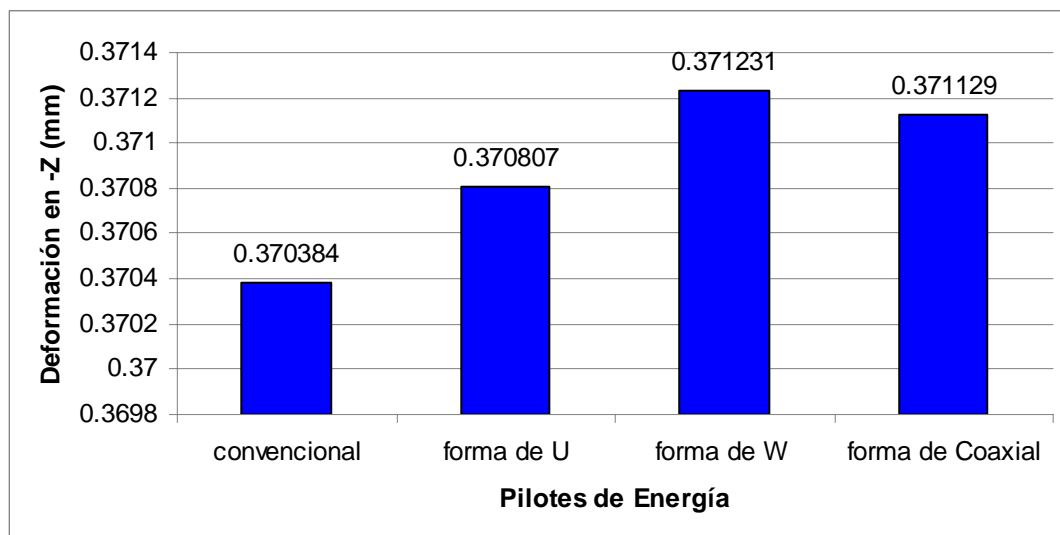


Figura 3.69. Deformación axial para los pilotes de 1,0 m de diámetro

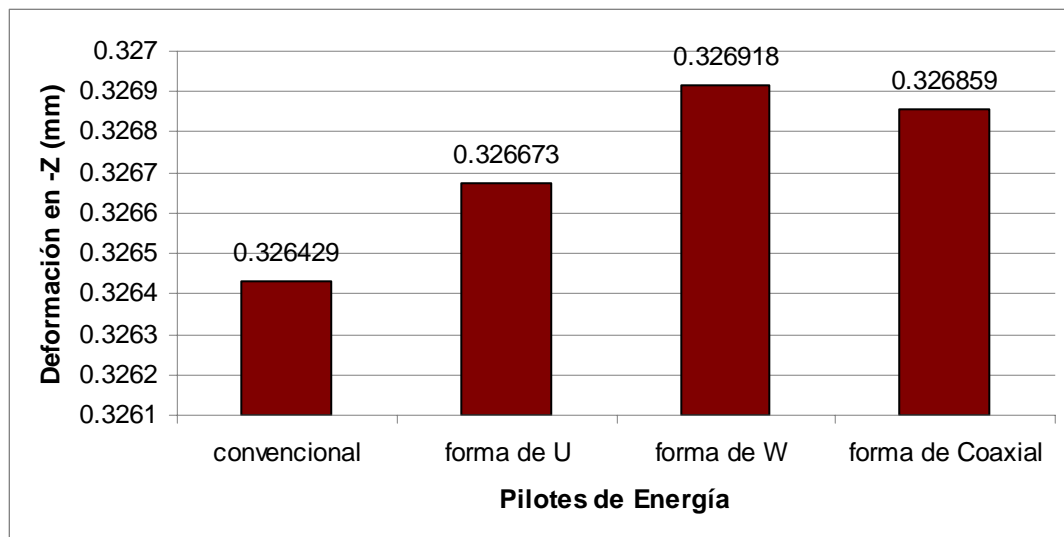


Figura 3.70. Deformación axial para los pilotes de 1,2 m de diámetro

Como se puede apreciar en la figura 3.66 los pilotes que sufren mayor deformación son los pilotes de menor del diámetro (0,4 m) presentados deformaciones que oscilan desde los 0,7659 mm hasta el mayor caso 0,7794. No obstante es fácil de apreciar que para todos los casos presentados el pilote de energía que sufre mayor deformación con respecto al resto dentro de su diámetro es el pilote de energía tipo W, resultado como el pilote de energía más desfavorable.

Con la finalidad de facilitar la comparación entre los pilotes de energía se genero la figura 3.71, la cual ilustra por medio de tres líneas que representan los pilotes de energía con forma de U (Color Azul-línea rombo), W (Color purpura-línea cuadrado) y Coaxial (color amarillo-línea triangulo), dentro de su eje vertical valores de la diferencia entre cada uno de los pilotes de energía y el pilote convencional y finalmente en el eje horizontal los cada uno de los diámetros analizados (0,4m; 0,6m; 0,8m; 1,0m; 1,2m). Todo esto es presentado a continuación.

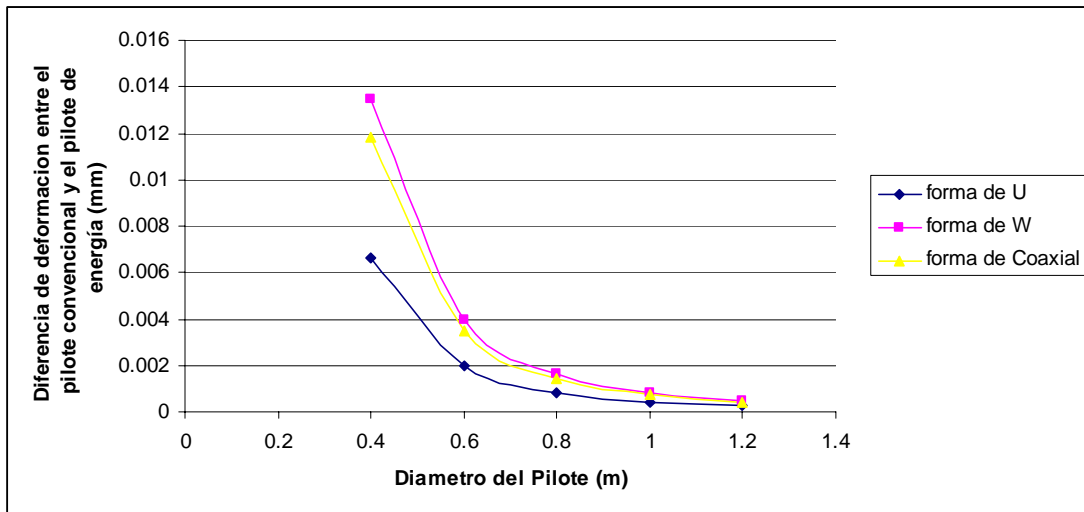


Figura 3.71. Tendencia de los pilotes según su deformación axial.

Los resultados obtenidos de la gráfica 3.71 representa la tendencia de la disminución de la diferencia entre los pilotes de energía y los pilotes convencionales, la cual a medida de que el pilote va aumentando de diámetro esta diferencia se acerca más a cero, i.e.: en cualquiera de los tres casos de los pilotes de energía la mayor diferencia contra el pilote convencional está presente en el diámetro de 0,4 m y la menor diferencia que casi es cero se muestra en el diámetro de 1,2 m.

En la figura 3.71 se aprecia que el pilote que genera mayor desventaja del grupo de los pilotes de energía es el pilote tipo W al generar la línea más alta entre las diferencia de las deformaciones, seguido por el pilote de energía tipo Coaxial y luego por el tipo U. También muestra que al usar diámetros mayores de los 0,8 m las diferencia entre la deformación del pilote convencional y cualquiera de los pilotes de energía rodea los valores de 0,0016 mm y 0,00043 mm, representado valores muy bajos.

Se concluye que si es necesario hacer un cálculo preciso de la deformación que sufren los pilotes de energía, se recomienda hacerlo para pilotes de diámetros menores a 0,8 m ya que para diámetros mayores a ese valor la diferencia de deformación con respecto al pilote convencional es muy pequeña, la misma es próxima a cero.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES

1- El pilote de energía más eficiente es el de forma coaxial debido a que la temperatura de los canales de agua saliente tiene la mayor aproximación a la temperatura del suelo con respecto al resto de los modelos. Estos resultados se alcanzan debido a que dichos canales se encuentran cerca de las paredes de los pilotes. Además la temperatura del agua no llega a ser afectada por el canal de agua descendiente, ya que el tubo central se encuentra aislado térmicamente. Todas estas razones hacen que la resistencia térmica del pilote de energía con forma coaxial sea la más baja.

2- Los resultados obtenidos del análisis de capacidad de carga demuestran que para el caso más desfavorable solo varia en un cuatro por ciento de la capacidad de carga de un pilote convencional, permitiendo que con el simple hecho de usar un factor de seguridad en el diseño del pilote estos valores sean depreciables. No obstante el análisis de la deformación axial también brinda un resultado favorable exponiendo que la diferencia de la deformación axial entre un pilote de energía y un pilote convencional se aproxima a cero cuando se usa diámetros mayores a 0,8 m y se recomienda que si es necesario tener valores precisos de la deformación axial de los pilotes de energía se haga para diámetros menores a 0,8 m ya que superior a ello es despreciable. Todas estas razones favorecen al uso de los pilotes de energía, ya que demuestran que desde los puntos de vista analizados en este proyecto estos son confiables.

3- Los modelos de los pilotes de energía fueron validados con la finalidad de alcanzar el objetivo numero 6. Los modelos térmicos en tercera dimensión y en secciones transversales muestran una buena relación entre ellos. La resistencia térmica y la extracción de calor por metro, resulto estar dentro del mismo rango establecidos en los estudios presentados en el fundamento teórico. Todos los análisis estructurales de los pilotes de energía fueron realizados en pareja con el de los pilotes convencionales, con la finalidad de comparar sus resultados y permitir su auto validación.

4- Es necesario utilizar la anchura de los pilotes de energía como una ventaja, con el fin de alcanzar un mejor desempeño térmico. Esto puede ser enfocado al separar los canales de fluidos descendentes y ascendentes lo máximo posible, entonces las temperaturas de los canales de agua no se verían afectadas entre ellas y también con la finalidad de que estas se acerquen lo más posible al suelo.

5- Es indispensable estudiar cuidadosamente los periodos de cada ciclo de extracción de calor con el suelo al tratar de utilizar los periodos más cortos posibles. Esta conclusión es tomada con el fin de que los canales de agua alcancen la diferencia de temperatura más baja con respecto al suelo, optimizándose el desempeño de los pilotes de energía.

6- La evaluación de diferentes arreglos de pilotes de energía usando el programa COMSOL Multiphysics es muy complejo en el sentido del modelado, ya que esto envuelve una interacción fluido-calor. Es necesario aplicar una malla bien definida con elementos de 90 grados entre ellos, a lo largo del recorrido del fluido, esto proporciona un suave resultado en el perfil de velocidad, que luego puede ser utilizado como valores de entrada para el módulo de transferencia de calor (módulo de convección y conducción).

RECOMENDACIONES

Es posible dar algunas recomendaciones para análisis futuros:

Es recomendado el uso de los modelos de sección transversal, con el objetivo de estudiar la temperatura en el suelo debido al calor que rodea a los pilotes durante la extracción o inyección de calor. Dichos modelos contienen mucho más detalle en su geometría y materiales, así como también su malla puede ser mucho más refinada.

El estudio de la interacción flujo-calor utilizando flujo turbulento, ya que este generaría un resultado más aproximado a su realidad.

Analizar el almacenamiento de calor en el suelo para diferentes tipos de arreglos de pilotes de energía cuando ellos son colocados en grupo.

Estudiar cómo se afecta el suelo debido a los cambios de temperatura y sus repercusiones en la capacidad de carga debido a la fricción.

Analizar el comportamiento de los pilotes de energía con respecto a las deformaciones laterales o pandeo.

Comparar el desempeño energético y estructural de cualquier otro pilote de energía con diferentes tipos de arreglo en contra de pilote de energía Coaxial que resultó ser el más eficiente.

Estudiar los elementos de juntas o nodos de los pilotes de energía, con el propósito de alcanzar mayores profundidades, evitando los daños de las tuberías cuando los pilotes sean incados (pilotes prefabricados) y obtener una disposición final de las tuberías de forma eficiente que no genere problemas al continuar con la construcción del resto de los elementos estructurales.

CAPITULO V

APÉNDICE

5.1 Apéndice térmico.

El presente apéndice muestra con mayor detalle los diferentes casos que fueron utilizados para comparación durante el análisis térmico.

5.1.1 Comparación de temperaturas de canales de agua para los pilotes de energía con forma de U (tubos cercanos unos a otros)

Estos modelos fueron computados bajo las mismas condiciones a los modelos previamente explicados de forma de U, explicados en la sección 3.1 para un periodo de 24 horas, sin embargo; este tiene 0.1 metros centro-centro de separación entre cada canal de agua (Figura 5.1). Estos resultados (Figura 5.2 y Figura 5.3) tienen el propósito de ser comparados con los pilotes de energía con forma de U.

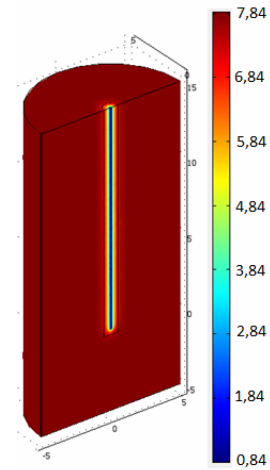
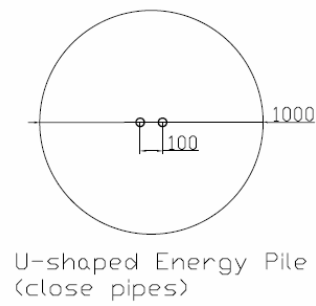


Figura 5.1 Dimensiones del pilote con tuberías cercanas.

Figura 5.2 Resultados en tres dimensiones de pilote de energía con forma de U (tubos cercanos unos a otros) en °C

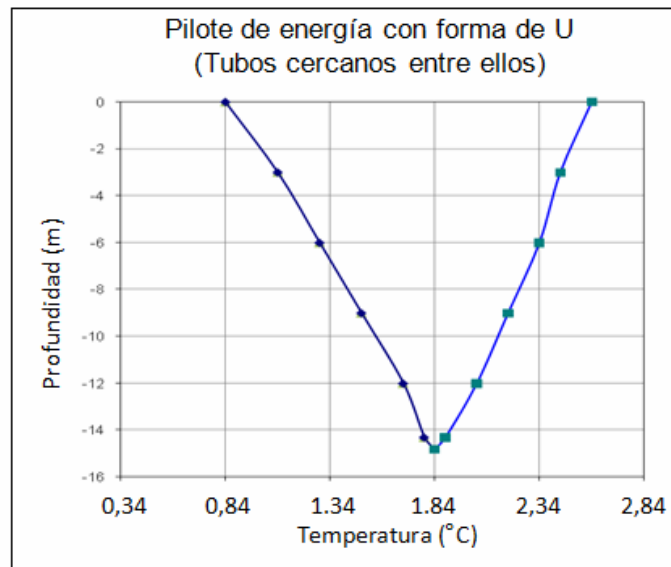


Figura 5.3 Temperatura contra profundidad para pilote de energía con forma de U (tubos cercanos unos a otros).

5.1.2 Perfil de temperatura para el periodo de trayectoria del agua

Este modelo fué computado bajo las mismas subdominios, condiciones de borde y de malla que el pilote de energía con forma de U explicado previamente en la sección 3.2.1 Sin embargo fué utilizado para su cálculo el periodo de tiempo en que el agua viaja desde la condición inicial a la final con la finalidad de comparar dicho resultado con el análisis previo.

La figura 3.51 muestra el resultado del perfil de temperatura en una vista 3D (a), el detalle de temperatura descrito por superficies isotérmicas de la parte superior (c) y fondo (b). La figura 5.3 ilustra el perfil de temperatura de este análisis (temperatura en contra de profundidad).

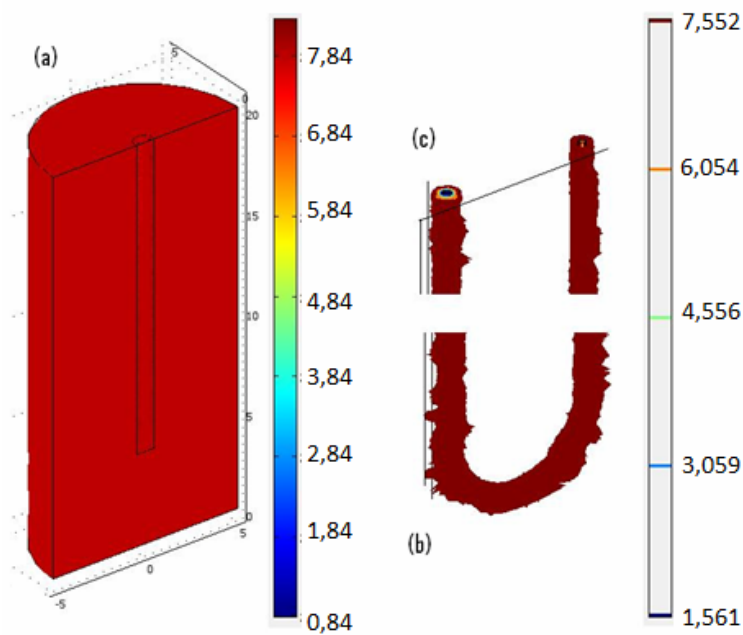


Figura 5.4 Resultado del perfil de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para el pilote de energía en tres dimensiones (a); detalle del tope (b); detalle del fondo (c), para un periodo de tiempo de 251 seg.

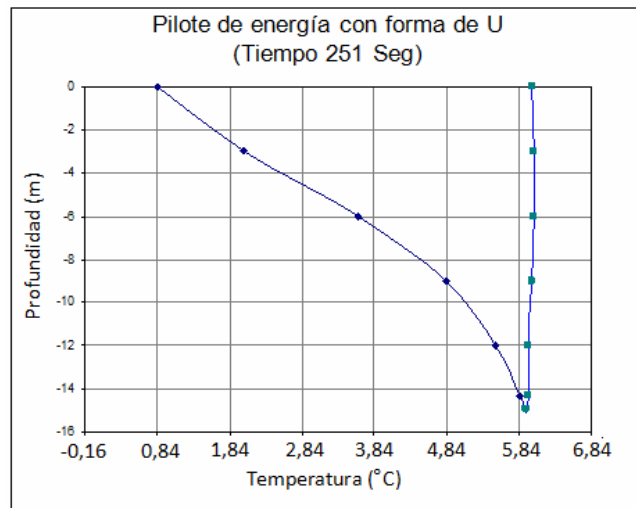


Figura 5.5 Profundidad contra Temperatura para pilote de energía para un periodo de tiempo de 251 seg.

5.2 Apéndice estructural

5.2.1. Nomenclatura de la Ecuación 3 para la capacidad última debido al trabajo de punta

$$P_{pu} = A_p [cN'_c + \bar{n}q(N'_q - 1)]$$

Ecuación 3. Capacidad última debido al trabajo por punta.

Nomenclatura:

C = Cohesión

N'_c = Factor de cohesión debido al trabajo de punta.

N'_q = Factor de sobrecarga debido al trabajo de punta.

q = Esfuerzo vertical efectivo (presión de sobrecarga).

5.2.2 Tablas de origen para gráficas de barras de porcentaje de reducción de la capacidad de carga Vs Pilote de energía

A continuación se presentaran las tablas de los datos de origen para la gráfica de barras de reducción de capacidad de carga clasificadas por los diámetros de los pilotes presentada para ambos casos; termino (A) representado el 50% y 100%.

Tabla 5.1. Para el pilote de 0.4 m de diámetro:

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 50%) | B 50% |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| Pilote típico | 100,000 | 50,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de U | 99,000 | 49,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de W | 98,000 | 48,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,040 | 49,040 | 50,000 |

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 100%) | B 0% |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Pilote típico | 100,000 | 100,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de U | 98,000 | 98,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de W | 96,000 | 96,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 98,080 | 98,080 | 0,000 |

Tabla 5.2. Para el pilote de 0.6 m de diámetro:

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 50%) | B 50% |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| Pilote típico | 100,000 | 50,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de U | 99,556 | 49,556 | 50,000 |
| Pilote con forma de W | 99,111 | 49,111 | 50,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,573 | 49,573 | 50,000 |

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 100%) | B 0% |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Pilote típico | 100,000 | 100,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de U | 99,111 | 99,111 | 0,000 |
| Pilote con forma de W | 98,222 | 98,222 | 0,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,147 | 99,147 | 0,000 |

Tabla 5.3 Para el pilote de 0.8 m de diámetro:

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 50%) | B 50% |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| Pilote típico | 100,000 | 50,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de U | 99,750 | 49,750 | 50,000 |
| Pilote con forma de W | 99,500 | 49,500 | 50,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,760 | 49,760 | 50,000 |

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 100%) | B 0% |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Pilote típico | 100,000 | 100,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de U | 99,500 | 99,500 | 0,000 |
| Pilote con forma de W | 99,000 | 99,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,520 | 99,520 | 0,000 |

Tabla 5.4. Para el pilote de 1,0 m de diámetro:

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 50%) | B 50% |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| Pilote típico | 100,000 | 50,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de U | 99,840 | 49,840 | 50,000 |
| Pilote con forma de W | 99,680 | 49,680 | 50,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,846 | 49,846 | 50,000 |

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 100%) | B 0% |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Pilote típico | 100,000 | 100,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de U | 99,680 | 99,680 | 0,000 |
| Pilote con forma de W | 99,360 | 99,360 | 0,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,693 | 99,693 | 0,000 |

Tabla 5.5. Para el pilote de 1,2 m de diámetro:

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 50%) | B 50% |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|--------------|
| Pilote típico | 100,000 | 50,000 | 50,000 |
| Pilote con forma de U | 99,889 | 49,889 | 50,000 |
| Pilote con forma de W | 99,778 | 49,778 | 50,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,893 | 49,893 | 50,000 |

| Tipo de pilote | Pu= (100%) | Ap x (A 100%) | B 0% |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------|
| Pilote típico | 100,000 | 100,000 | 0,000 |
| Pilote con forma de U | 99,778 | 99,778 | 0,000 |
| Pilote con forma de W | 99,556 | 99,556 | 0,000 |
| Pilote con forma de Coaxial | 99,787 | 99,787 | 0,000 |

5.2.3 Tablas de origen para gráficas de porcentaje de reducción de la capacidad de carga Vs diámetro del pilote

Las tablas 5.6, tabla 5.7 y tabla 5.8 representa una compilación de valor extraídos de las tabla 5.1, tabla 5.2, tabla 5.3, tabla 5.4y tabla 5.5 la cual permiten una mejor apreciación del comportamiento de la reducción de carga de los pilotes de energía.

Tabla 5.6. Datos de origen para la tendencia de reducción de carga correspondiente al pilote de energía tipo U

| DIÁMETRO | Ppu =50 % | Ppu =100% |
|-----------------|------------------|------------------|
| 0,4 | 99 | 98 |
| 0,6 | 99,56 | 99,11 |
| 0,8 | 99,75 | 99,5 |
| 1 | 99,84 | 99,68 |
| 1,2 | 99,89 | 99,78 |

Tabla 5.7. Datos de origen para la tendencia de reducción de carga correspondiente al pilote de energía tipo W

| DIÁMETRO | Ppu =50 % | Ppu =100% |
|-----------------|------------------|------------------|
| 0,4 | 98 | 96 |
| 0,6 | 99,11 | 98,22 |
| 0,8 | 99,5 | 99 |
| 1 | 99,68 | 99,36 |
| 1,2 | 99,78 | 99,56 |

Tabla 5.8. Datos de origen para la tendencia de reducción de carga correspondiente al

pilote de energía tipo Coaxial.

| DIÁMETRO | Ppu =50 % | Ppu =100% |
|----------|-----------|-----------|
| 0,4 | 99,04 | 98,08 |
| 0,6 | 99,57 | 99,15 |
| 0,8 | 99,76 | 99,52 |
| 1 | 99,85 | 99,69 |
| 1,2 | 99,89 | 99,79 |

5.2.4 Tablas de origen para las gráficas de deformación axial para los diferentes tipos de pilotes de energía

A continuación se presentan los valores de deformación axial para cada tipo de pilotes, convencional, con forma de U, con forma de W y con forma Coaxial con respecto sus diámetros.

Tabla 5.9. Datos de origen para las gráficas correspondientes a la deformación axial.

| DIÁMETROS (m) | DEFORMACIÓN EN DIRECCIÓN Z (mm) PARA LOS PILOTES | | | |
|---------------|--|-----------|-----------|--------------|
| | CONVENCIONAL | TIPO U | TIPO W | TIPO COAXIAL |
| 0,40 | -0,765985 | -0,772645 | -0,779441 | -0,777798 |
| 0,60 | -0,546200 | -0,548169 | -0,550149 | -0,549672 |
| 0,80 | -0,436318 | -0,437144 | -0,437974 | -0,437775 |
| 1,00 | -0,370384 | -0,370807 | -0,371231 | -0,371129 |
| 1,20 | -0,326429 | -0,326673 | -0,326918 | -0,326859 |

BIBLIOGRAFÍA CITADA.

- [1] LIU C. y EVETT, J. (1998). “**Soils and foundations**”, Nueva Jersey, U.S.A.
- [2] BOWLES E, J. (1998), “**Foundation analysis and design**”, Peoria, Illinois, U.S.A.
- [3] THE SOLARSERVER (2008). “**Forum solar energy**”, www.solarserver.de.
- [4] ESKILSSON, P. (1987). “**Thermal analysis of heat extraction Boreholes**”, Universidad de Lund, Departamento de física matemática, Suecia.
- [5] ACUÑA, J. (2008). “**Characterization of boreholes – results from a U-Pipe Borehole heat exchanger installation**”, Instituto real de tecnología KTH, Departamento de tecnología, Suecia.
- [6] HELLSTRÖM, G. (1991), “**Ground heat storage**”, Departamento de física matemática, Universidad de Lund, Lund, Suecia.
- [7] PLATELL, P. (2008), “**Energipålar Kostnadseffektiv och miljövänling värme och kyla till byggnader**” Estocolmo, Suecia.
- [8] GAO, J. ZHANG, X. LIU, J. LI, S. y YANG, J. (2008). “**Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study**”, Instituto de Ingeniería HVAC&GAS, Escuela de Ingeniería mecánica y Universidad de Tongji, China.

- [9] OOKA, R. SEKINE, K. YOKOI, M. SHIBA y HWANG, S. (2007). **“Development of a ground source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundations of a building”**, Universidad de Tokio, Taisei Corporation, y Zeneral Heatpump Industry Co. Ltd. Tokio, Japón.
- [10] KATSURA, T. NAKAMURA, Y. NAGANO, K. FUJIWARA Y. HORI, S. y OKAWADA, T. (2008). **“Field tests of heat extraction or injection using foundation piles as ground heat exchangers applying low flow circulation”**, Universidad de Hokkaido, y Instituto de ciencias ambientales Fujiwara Ltd. Hokkaido, Japón.
- [11] PAHUD, D. (2008). **“Measured thermal performances of the dock midfield ground source system at Zürich airport”**, Universidad de ciencias aplicadas sureña del Suiza, y Universidad de Ciencias aplicadas de Zúrich, Suiza.
- [12] COMSOL AB. ©, (2008). **“Introduction to Multiphysics Modeling”** Estocolmo, Suecia, 2008.
- [13] COMSOL AB. ©, (2008). **“Multiphysics user’s guide”**, Estocolmo, Suecia, 2008.
- [14] COMSOL AB. ©, (2008). **“Heat transfer module user’s guide”**, Estocolmo, Suecia, 2008.
- [15] SAP2000 ®, (2006). **“Basic analysis reference manual”**, Berkeley, California, U.S.A.
- [16] Mouvitech AB (2008) **“Brochure 2008”**, Brämhult, Suecia.

[17] INCROPERA, F. DEWITT, D. BERGMAN T. (2007) “**Fundamentals of heat and mass transfer**”, Universidad de Notre Dame, Universidad Purdue, Universidad de Connecticut y Universidad de California.

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

SPIEGEL, L. y LIMBRUNNER, G. (1986), **“Reinforced concrete design”**, Hudson valley community college, New York, U.S.A.

WANG, C. y SALMON, C (1998), **“Reinforced concrete design”**, Universidad de Wisconsin, Madison, U.S.A.

ROJAS, C. “Manual para la presentación del proyecto y de la tesis de pregrado en ingeniería”, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui, Venezuela.

FRATELLI, M. (2008). **“Suelos, fundaciones y muros”** Caracas, Venezuela.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| | |
|------------------|---|
| TÍTULO | EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ENERGÍA |
| SUBTÍTULO | TOMANDO EN CUENTA LA EFICIENCIA DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL Y TRANSFERENCIA DE CALOR |

AUTOR (ES):

| APELLIDOS Y NOMBRES | CÓDIGO CULAC / E MAIL |
|-----------------------------|---|
| Williams S. Jesús M. | CVLAC: 17.732.681 E MAIL: jesusmwilliams@gmail.com |
| | CVLAC: E MAIL: |

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PILOTES DE ENERGÍA, USANDO EL SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS, TOMANDO EN CUENTA LA EFICIENCIA DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL Y TRANSFERENCIA DE CALOR PARA DIFERENTES TIPOS DE CONFIGURACIONES DE PILOTES DE ENERGÍA.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| ÁREA | SUBÁREA |
|---------------------------------|------------------|
| Ingeniería y ciencias aplicadas | Ingeniería Civil |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

RESUMEN (ABSTRACT):

Un sistema de pilotes de energía proviene de la combinación de dos principios, uno los pilotes como fundaciones profundas y dos los pozos intercambiadores de calor BHE (Borehole heat exchanger), este sistema tiene como función el aprovechamiento de la energía geotérmica proveniente de un estrato profundo. También provee una forma fácil de instalar los BHE y reduce los elevados costos de perforar pozos dentro del suelo. El desempeño de intercambiar energía térmica con el suelo en los pilotes de energía depende del arreglo de tuberías, el cual será estudiado con los modelos existentes y las mejoras que se hagan a conveniencia. La esencia de esta investigación es chequear la factibilidad del aprovechamiento de la energía geotérmica mediante el sistema de pilotes de energía desde el punto de vista térmico y estructural. Con respecto a la evaluación del comportamiento de los pilotes de energía, este proyecto se enfoca en simular cada modelo térmico en un software llamado COMSOL Multiphysics, utilizando diferentes módulos, teniendo como finalidad conocer cual arreglo obtiene un mejor desempeño térmico. La perspectiva estructural dentro de la investigación es verificar cómo se ve afectada la resistencia del pilote (capacidad de carga y deformación axial) al añadir las tuberías.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

| APELLIDOS Y NOMBRES | ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------|-------------|-------------|
| Diaz Juan F. | ROL | CA | AS | TU X | JU |
| | CVLAC: | 8.256.085 | | | |
| | E_MAIL | felproca@gmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| Velasquez Geronimo | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | 4.012.752 | | | |
| | E_MAIL | geronimovelaquez@gmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| Ruiz C. Edmundo D. | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | 4.026.960 | | | |
| | E_MAIL | edmundoruizc@hotmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | ROL | CA | AS | TU | JU |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

| | | |
|-------------|--------------|------------|
| 2009 | julio | 6 |
| AÑO | MES | DÍA |

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

| NOMBRE DE ARCHIVO | TIPO MIME |
|---|--------------------|
| TESIS. Evaluación del comportamiento de pilotos de energía. | Application/msword |

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Civil

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Civil

INSTITUCIÓN:

Universidad De Oriente. Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

AUTOR**AUTOR**

Williams S. Jesus M.

TUTOR**JURADO****JURADO**

Diaz, Juan F.

Velasquez, Geronimo

Ruiz C. Edmundo D.

POR LA SUBCOMISION DE TESIS