



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

**ACUMULACIÓN DE DEFORMACIONES EN INTERFACES SUELO ESTRUCTURA
INDUCIDAS TÉRMICAMENTE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y
GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

EMILIA MARÍA JOSÉ CASTILLO FUENTES

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES
DOUGLAS CORTÉS

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA, MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y GEOTÉCNICA Y AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL.
POR: Emilia María José Castillo Fuentes.
FECHA: 08/01/2018
PROFESOR GUÍA: César Rodrigo Pastén Puchi.

ACUMULACIÓN DE DEFORMACIONES EN INTERFACES SUELO ESTRUCTURA INDUCIDAS TÉRMICAMENTE

Numerosas aplicaciones geotécnicas involucran la interacción del suelo con estructuras a través de interfaces. Este trabajo estudia el efecto de la variación de temperatura en la acumulación de deformaciones en estas interfaces cuando están sometidas a una carga estática menor a la crítica, pero que pueden causar deslizamientos a lo largo de la interfaz. Esta tesis tiene como principal objetivo desarrollar una metodología experimental, numérica y analítica que permita evidenciar este fenómeno, y finalmente estudiar su desarrollo en un ejemplo práctico, como lo son los pilotes termo-activos. Este fenómeno, conocido como *ratcheting* (Alonso-Marroquín y Herrmann, 2004), se estudia en este trabajo mediante el desarrollo de un montaje experimental, donde un bloque de acrílico se ubica horizontalmente sobre suelo arenoso seco, y que, mientras es cargado estáticamente en dirección paralela a la interfaz, es sometido a ciclos de temperatura. Esta configuración permite confirmar que bajo ciertos estados de carga (cerca de la condición crítica al deslizamiento en la interfaz), la amplitud, periodo y número de ciclos de temperatura desencadenan el fenómeno de acumulación de deformaciones.

De manera adicional, y a modo de verificar los resultados experimentales, se elabora un modelo termo-mecánico de elementos finitos y un modelo analítico basado en el principio de transferencia de carga en pilotes y que incorpora deformaciones termo-elásticas. Los resultados de estas tres metodologías son consistentes, permitiendo evidenciar el fenómeno en estudio, además de la identificación de aquellos parámetros más relevantes en su desarrollo, como por ejemplo el coeficiente de expansión térmica, el Factor de Seguridad al deslizamiento y la amplitud y periodo de los ciclos de temperatura. Se muestra, además, la proporcionalidad que existe entre la tasa de acumulación de desplazamientos y estos parámetros. Por otro lado, los resultados de la aplicación a pilotes termo-activos en elementos finitos, muestran consistentemente que para estos sistemas, la temperatura efectivamente incide en su desempeño a largo plazo, principalmente en términos de su serviciabilidad. Efecto que se explica por la sucesión de contracciones y expansiones del material del que ha sido construido el pilote.

A mis padres, a su incondicional entrega y amor

Agradecimientos

Cuando se ha tenido la fortuna de conocer gente maravillosa en este largo camino, resulta imposible no sentirse agradecido de la vida. Sin embargo, antes que cualquiera, agradezco a mis padres Emilia y Eduardo, a quienes admiro y amo mucho, quienes me apoyaron incondicionalmente en todos mis sueños, y nunca me limitaron. Agradezco ser su hija, de ser hija de una mujer valiente, perseverante y fuerte, y de un hombre sabio y honesto, los quiero papás.

A mis hermanos, Eduardo y Alejandro, porque a pesar de la distancia siempre se preocuparon por mí y me apoyaron tanto emocionalmente como económicamente, también por darme 5 hermosas sobrinas que son una alegría en todo momento.

A mi pololo José, a mi compañero de sección que se transformó en compañero de vida, a ese incondicional que siempre fue paciente conmigo, con quien he aprendido y seguiré aprendiendo, quien en los momentos más difíciles ha sido fundamental. A tí, José, te agradezco infinito, esta tesis sin duda no la habría terminado si no fuera por tu ayuda. Te amo.

Quisiera agradecer también, a la natación, porque conocerla en la U, me entregó grandes amistades, momentos inolvidables y experiencias inigualables. Por esos amigos que me dio el agua, los de la rama "old school": Maca, Diego, Ema, Hilda, Pablo, Nico, Rosa... ya no nos vemos tan seguido pero la comunicación siempre se mantiene. A los de mi nuevo club, quienes han sido fundamentales sobre todo en la etapa de esta tesis: a la Pau por su enorme apoyo y por su grandeza de corazón, Barbi, por ser un ejemplo de disciplina y perseverancia, Ele, porque eres una maravillosa mujer. A los tres buenos entrenadores que tuve, la Moni por aceptarme y siempre creer en mí, escuchar mis lamentos antes de entrar al agua y por ser una gran mujer. A Cristián, que me aceptó en la selección casi sin conocerme, que también fue un gran escucha y con quien también pude crecer. A Gabriel, mi entrenador actual, con quien la disciplina, el aguante y el vamos que se puede son pan de cada día, gracias por ser tú.

También quisiera agradecer a quienes en esta última etapa fueron muy muy importantes, a los geopecceros, con quienes de manera inesperada y maravillosa pude establecer una bonita amistad, excelentes estudiantes y no dudo que ahora muy buenos profesionales. Nati, Suso, Mei, Magda, Jose, Alo, Mauro, tienen una gran calidad humana. Andrés Torres: ☺.

Quisiera agradecer el apoyo que he recibido de mis compañeros de trabajo y de mis jefes por darme todas las facilidades para terminar este trabajo. En especial quisiera agradecer a la Caro Vergara por su apoyo y el ánimo dado, trabajar juntas me ha permitido aprender mucho, tanto a nivel profesional como humano.

También quisiera agradecer al profesor César Pastén por el apoyo y paciencia en la realización de este trabajo, y a los miembros de la comisión por su valioso aporte en este trabajo.

Esta tesis fue financiada por el Grupo de Geotecnia y el Magister en Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotécnica de la Universidad de Chile

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	General	1
1.2	Objetivo General	4
1.3	Objetivos Específicos	4
1.4	Estructura de la Tesis.....	5
2	Estudio Experimental	6
2.1	Montaje Experimental.....	6
2.2	Metodología	11
2.3	Programa de Ensayos.....	13
2.4	Resultados	15
3	Modelamiento Numérico	21
3.1	Consideraciones teóricas	21
3.2	Modelo de elementos finitos.....	23
3.3	Modelamiento de Ensayos de Laboratorio	29
3.4	Análisis Paramétrico.....	34
4	Modelo Analítico	42
4.1	Antecedentes	42
4.2	Metodología	46
4.3	Resultados	48
5	Aplicación Práctica	56
5.1	Antecedentes Generales.....	56
5.2	Metodología	61
5.3	Resultados	67
6	Conclusiones y Recomendaciones.....	74
6.1	Conclusiones.....	74
6.2	Recomendaciones.....	77
	Bibliografía	78
	Anexo A – Memoria de Cálculo de Capacidad de Soporte Pilotes.....	81

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema del montaje experimental	7
Figura 2. Montaje experimental. 1) cámara aislada térmicamente. 2) Sensores de desplazamiento LVDT y Láser. 3) Sistema de control y adquisición de datos y alimentación.	7
Figura 3. a) ampollitas y ventilador. b) bloque de acrílico sobre arena, con dos termopares, uno al interior y otro en la superficie.....	8
Figura 4. a) montaje sensores medición de desplazamiento. b) detalle de instrumentos utilizados: sensor LVDT (1) y Láser (2)	8
Figura 5. Registros obtenidos de un ensayo tipo. T_{sup} es la temperatura en la superficie del acrílico, T_{int} en la cámara, T_{acr} al interior del bloque, T_{lab} fuera de la cámara. La línea de color negro indica el desplazamiento medido con el sensor LVDT.	12
Figura 6. Ensayos experimentales tipo, que evidencian la influencia del tiempo en alcanzar la estabilización de la temperatura media de los ciclos en la linealidad de la acumulación de desplazamientos en el tiempo. La línea de color rojo representa la mejor recta que describe los desplazamientos en el tiempo. T_{acr} es la temperatura medida al interior del acrílico, LVDT corresponde al registro de desplazamientos obtenidos por este sensor. a) Es el ensayo que tarda más tiempo en estabilizar su temperatura media, por lo que su fase cíclica o lineal comienza después que el ensayo en b).....	16
Figura 7. Ensayo de larga duración, que muestra la tendencia lineal del comportamiento en el largo plazo.	17
Figura 8. Resultados experimentales que reflejan la influencia de los ciclos de temperatura en el fenómeno de acumulación de desplazamientos. T_{acr} corresponde a la temperatura al interior del acrílico y LVDT al registro del sensor.	18
Figura 9. Resultados experimentales que muestran la influencia del periodo de los ciclos en la acumulación de desplazamientos.....	19
Figura 10. Influencia del factor de seguridad al deslizamiento en el fenómeno de acumulación de desplazamientos.	20
Figura 11. Resultados experimentales de ensayos sobre distintas superficies bajo el mismo factor de seguridad al deslizamiento.	20
Figura 12. Dimensiones y malla del modelo de elementos finitos. a) Corresponde al mallado utilizado en todos los modelos de elementos finitos y b) la malla para el análisis del efecto del tamaño de los elementos.	24
Figura 13. Resultados para el modelamiento en elementos finitos de un ensayo experimental, resultados para la ejecución del modelo en malla fina y malla normal. ...	25
Figura 14. Superficies donde se aplican las distintas condiciones de borde del problema	27
Figura 15. Comparación de la temperatura al interior del acrílico (T_{in}) obtenidas del registro con el termopar, y de la medición en el nodo al centro del modelo de elementos finitos.....	28

Figura 16. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia de la temperatura media. Curva color negro corresponde a los desplazamientos, de color azul la temperatura al interior del acrílico. a) ensayo con una temperatura media de aproximadamente 45°C. b) ensayo con temperatura media de aproximadamente 30°C.30

Figura 17. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia de la amplitud y periodo de los ciclos de temperatura. a) ensayo con menor amplitud y menor periodo. b) ensayo con amplitud y periodo intermedios. c) ensayo con amplitud y periodo mayores. Curva de color negro corresponde a los desplazamientos, en azul la temperatura al interior del bloque de acrílico.....31

Figura 18. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia del periodo de los ciclos de temperatura. Curva de color negro corresponde al desplazamiento, en azul la temperatura al interior del acrílico. a) ensayo con menor periodo y mayor tasa de acumulación de desplazamientos. b) ensayo con mayor periodo, y menor tasa de acumulación de desplazamientos.32

Figura 19. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia del Factor de Seguridad. Curva de color negro corresponde al desplazamiento, en azul la temperatura al interior del acrílico. a) es el ensayo con FS=12. b) es el ensayo con FS=2 y c) es el ensayo con FS=1.5 y más crítico.33

Figura 20. Tasa de acumulación de desplazamientos en función del factor de seguridad, resultados numéricos y experimentales.33

Figura 21. Efecto del desplazamiento crítico elástico definido en el contacto tangencial entre las superficies acrílico-suelo. Ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C.....36

Figura 22. Influencia del coeficiente de roce en la acumulación de desplazamientos, aplicación de condición de borde de temperatura de ciclos sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C. Para tres coeficientes de roce diferentes, donde se mantiene constante el factor de seguridad al deslizamiento FS=2.....36

Figura 23. Influencia del periodo y de la amplitud de los ciclos de temperatura en el fenómeno de acumulación de desplazamientos en la interfaz suelo-polímero. Análisis realizado con modelos con ciclos de temperatura artificiales correspondientes a sinusoides de amplitud y periodo variables.37

Figura 24. Efecto del Factor de Seguridad al deslizamiento en la acumulación de desplazamientos con los ciclos de temperatura. Análisis realizado con ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C38

Figura 25. Influencia del coeficiente de expansión térmica del bloque superior. Pruebas realizadas con ciclos de temperatura sintéticos sinusoidales de periodo 1 h y amplitud 15°C y set de parámetros correspondientes al caso base.39

Figura 26. Efecto de la variación de la conductividad térmica del suelo. Análisis realizado sobre ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C y con set de parámetros correspondientes al caso base.....40

Figura 27. Influencia de la conductividad térmica del acrílico. Pruebas realizadas con ciclos de temperatura sintéticos, sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C y set de parámetros correspondiente al caso base	41
Figura 28. Análisis de la influencia del módulo de elasticidad del bloque. Pruebas realizadas con ciclos de temperatura sintéticos, sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C y set de parámetros correspondiente al caso base.	41
Figura 29. Esquema del método de transferencia de carga: a) problema del pilote termo-activo b) modificación problema interfaz acrílico- suelo	43
Figura 30. Esquema resumen del algoritmo de resolución del modelo analítico del pilote, utilizado para reproducir el montaje experimental.	45
Figura 31. Efecto del número de segmentos en los resultados.....	48
Figura 32. Influencia del desplazamiento crítico elástico	49
Figura 33. Comparación de resultados a) experimentales, b) numéricos y c) del modelo analítico con propiedades representativas, test FS2-6C-1.8H	49
Figura 34. Tasa de acumulación de desplazamientos en función del desplazamiento crítico elástico.....	50
Figura 35. Resultados del modelo analítico con diferentes coeficientes de fricción suelo-material, donde se verifica la nula influencia si el FS es constante (FS=2).....	50
Figura 36. Análisis de sensibilidad al coeficiente de expansión lineal del acrílico.....	51
Figura 37. Tasa de acumulación de desplazamientos versus coeficiente de expansión lineal del bloque	52
Figura 38. Influencia de la amplitud de ciclos de temperatura	52
Figura 39. Tasa de acumulación de desplazamientos versus amplitud de los ciclos.	53
Figura 40. Análisis de sensibilidad del modelo analítico a la variación del módulo de elasticidad del acrílico	54
Figura 41. Análisis de sensibilidad del modelo analítico a la variación del factor de seguridad al deslizamiento de la interfaz suelo-acrílico	54
Figura 42. Tasa de acumulación de desplazamiento en función del factor de seguridad	55
Figura 43. Perfil de temperatura en profundidad y variaciones superficiales estacionales (Modificado de DENA, 2015).....	57
Figura 44. Esquema del funcionamiento de los sistemas geotérmicos genérico para calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha).....	57
Figura 45. Resultados de desplazamiento vertical en el tiempo para distintos tipos de pilote. Modificado de Saggi and Chakraborty (2015a).	60
Figura 46. Modelo de elementos finitos. a) Modelo completo b) Detalle de la zona cercana al pilote.....	62
Figura 47. Configuraciones de tipo de pilote del estudio.....	64
Figura 48. Curvas de carga obtenidas para los dos tipos de pilote, donde los desplazamientos se miden en la base de éstos	64
Figura 49. Condiciones de borde de temperatura analizados en el estudio.....	65
Figura 50. Resumen del estudio del caso práctico.....	66

Figura 51. Desplazamiento de la cabeza del pilote en el tiempo, producto de la aplicación de cargas verticales variables (en función del FS) y de ciclos de temperatura de amplitud 7.5°C y periodo 1 día. a) Análisis para caso de pilote en punta y b) pilote flotante.	68
Figura 52. Desplazamientos medidos en la cabeza del pilote para dos condiciones de borde de temperatura diferentes: ciclos de temperatura ambientales y en el pilote. La configuración utilizada corresponde a la del Pilote flotante con FS=2. La condición de borde de temperatura es una senoide de periodo 1 día y amplitud 7.5°C.	69
Figura 53. Perfil de temperaturas en el tiempo, en tiempo cero, medio día, 25 días y 50 días, para el caso con condición de borde ambiental.	69
Figura 54. Contornos de temperatura en el tiempo, para el caso con condición de borde de temperatura en el pilote.	70
Figura 55. Efecto del coeficiente de expansión lineal del pilote en el fenómeno de acumulación de desplazamientos. Pilote flotante con FS=2 y condición de borde de temperatura sinusoidal de amplitud 7.5°C y periodo 1 día.	71
Figura 56. Efecto del módulo de elasticidad del suelo en la base del pilote.	71
Figura 57. Influencia del módulo de elasticidad del pilote en la acumulación de desplazamientos. FS=2.	72

1 Introducción

1.1 General

La ingeniería geotécnica se encuentra con numerosos problemas que involucran la interacción del suelo con otros materiales. Ejemplo de ellos son las fundaciones, tuberías enterradas, muros de contención, túneles, uso de geosintéticos en taludes, por mencionar algunos. Comprender el comportamiento mecánico de la interfaz constituye un importante aspecto para lograr un diseño operacional adecuado para este tipo de aplicaciones, sobre todo en el largo plazo.

En este contexto, se ha realizado una gran cantidad de ensayos experimentales que buscan identificar y comprender las características del comportamiento mecánico del contacto suelo-material. Con este propósito, se han realizado ensayos de corte directo y corte simple en interfaces de suelo con materiales como acero (Potyondy, 1961; Kishida y Uesugi, 1987), hormigón (Martinez y Frost, 2016), y polímeros (O'Rourke et al., 1990) entre otros. Estos estudios se concentran en caracterizar el comportamiento esfuerzo-deformación asociado al esfuerzo de corte en la interfaz, que puede ser caracterizada mediante un comportamiento elasto-plástico tipo Mohr-Coulomb definido por un ángulo de fricción, que puede ser relacionado con el ángulo de fricción interna de los suelos, y cuyo valor dependerá de la rugosidad de la superficie y de la granulometría del suelo.

Problemas como el comportamiento termo-mecánico en discontinuidades de roca (Pastén et al., 2015a; Pastén et al., 2015b), acumulación gradual de desplazamiento de geomembranas sobre taludes (Pastén y Santamarina, 2014) y estructuras termo-activas (Brandl, 2006; Pastén y Santamarina, 2014; Vega y McCartney, 2015; Yavari, et al., 2016a) tienen condiciones de temperatura particulares que han incorporado la temperatura dentro de las variables de estudio en virtud de comprender los cambios en los esfuerzos y deformaciones producto de variaciones y ciclos de temperatura tanto en el corto como el largo plazo. Dentro de las principales conclusiones se encuentra la baja incidencia que tiene la temperatura en la resistencia al corte en suelos granulares, sin embargo, su efecto no debe despreciarse en el caso de la consolidación en arcillas, y en el desarrollo de excesos de presiones de poro que pudieran alterar su comportamiento. Por otro lado, se evidencia que, bajo ciertas condiciones de carga, en interacciones suelo-estructura los ciclos de temperatura podrían provocar deformaciones o asentamientos adicionales.

En este contexto, en las últimas décadas ha sido de especial interés el estudio de los sistemas geotérmicos de baja entalpía, que aprovechan la inercia térmica del suelo para climatizar casas y edificios (Fuenzalida, 2014; Lund y Boyd, 2015). Donde destacan los pilotes termo-activos, que permiten disminuir los altos costos de instalación de intercambiadores de calor a través del aprovechamiento de fundaciones profundas ya diseñadas para satisfacer requisitos estructurales, generándose el ahorro por concepto

de perforación. En estos pilotes se incorporan una serie de tuberías conformando un sistema secundario por donde circula un fluido que permite intercambiar calor con el suelo que le rodea, circuito que, mediante una bomba de calor, se conecta a una red primaria de tuberías instaladas en el edificio. Esto permite, cumplir una labor energética sustentable, no contaminante, y de bajo costo de mantenimiento (Brandl, 2006). Parte del interés geotécnico en estos sistemas es comprender la influencia de los ciclos de temperatura en el comportamiento termo-mecánico del suelo que rodea los pilotes, además de la respuesta en la interfaz, ya que sucesivos cambios de temperatura generan expansiones y contracciones en los pilotes que pueden desencadenar asentamientos irreversibles y acumulativos, fenómeno que es más conocido como *ratcheting*. La importancia de este fenómeno radica en la influencia que puede ejercer sobre el desempeño de la estructura al largo plazo.

Motivo de lo anterior, se busca desarrollar una metodología que ponga en evidencia este fenómeno de acumulación de deformaciones, y que sea capaz de identificar las variables más influyentes en su desarrollo. El estudio de este fenómeno en terreno está asociado a altos costos económicos, y tiempo. Por otro lado, los resultados que se pueden obtener no necesariamente garantizan su utilidad para la calibración de modelos, ya que las condiciones geométricas son muy específicas, además de que existe mucha incerteza respecto de la instalación realizada y de las condiciones de borde (Stewart y McCartney, 2013). Es por ello que este trabajo busca estudiar este fenómeno a través de un montaje experimental en laboratorio y modelamiento numérico, donde las variables puedan ser controladas de manera apropiada y se puedan reproducir gran parte de las condiciones de terreno.

El montaje experimental utilizado con este propósito corresponde a una modificación a lo utilizado por (Pastén et al., 2015) que consiste en un bloque de acrílico, material de alto coeficiente de expansión térmico lineal, apoyado sobre una base de arena seca. Este sistema se encuentra al interior de una cámara térmicamente aislada y cuya temperatura se regula con un termostato. El acrílico se encuentra sometido a una fuerza estática horizontal cuya magnitud es tal que la interfaz se encuentra en una condición crítica al deslizamiento. La fuerza se ejerce a través de un sistema de cable, poleas y un peso que pende verticalmente. Tanto la polea como el peso se encuentran fuera de la cámara. Para medir los desplazamientos laterales del acrílico, se instala un sensor LVDT y uno láser.

Los ensayos consisten en aplicar ciclos de temperatura al sistema acrílico-suelo, y medir los desplazamientos laterales que se pudieran desarrollar. El procedimiento se repite modificando los ciclos de temperatura, la magnitud del peso aplicado y la superficie bajo el acrílico.

Con el propósito de respaldar el estudio experimental, el montaje se modela con el método de los elementos finitos que acopla el fenómeno térmico y mecánico. Por otra parte, se realiza una modificación al modelo analítico propuesto por Pastén y Santamarina (2014), que estudia el comportamiento a largo plazo de pilotes termo-activos aplicando el principio de transferencia de carga, para representar las condiciones de laboratorio.

1.2 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es demostrar experimentalmente, con una verificación numérica y analítica, el desarrollo de desplazamientos relativos y su acumulación en la interfaz suelo-material bajo condiciones críticas al deslizamiento y ciclos de temperatura, además de identificar aquellas variables que indiquen en dicho fenómeno.

1.3 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta tesis son:

- Desarrollar un montaje experimental que permita medir los desplazamientos producidos por variaciones de temperatura, además de estudiar la influencia de la amplitud y periodo de los ciclos térmicos sobre la magnitud de los desplazamientos elásticos y plásticos producidos en la interfaz suelo-polímero.
- Establecer una relación entre el factor de seguridad al deslizamiento de la interfaz y los desplazamientos permanentes generados por los ciclos de temperatura.
- Desarrollar un modelo de elementos finitos que simule las condiciones de laboratorio y permita comparar la acumulación de desplazamientos en el tiempo con sucesivos ciclos de temperatura.
- Proponer un modelo analítico que permita calcular los desplazamientos como función de los ciclos de temperatura y que incorpore las variables más relevantes del problema, basado en un método de transferencia de carga unidimensional suelo-pilote.
- Desarrollar un modelo de elementos finitos de un pilote sometido a ciclos de temperatura, y verificar la acumulación de deformaciones inducida térmicamente.

1.4 Estructura de la Tesis

Esta tesis se divide en 6 capítulos, incluyendo la introducción. El Capítulo 2 muestra el desarrollo del montaje experimental, la ejecución de los ensayos de laboratorio, los resultados y su análisis. El Capítulo 3 muestra la metodología para la construcción del modelo en elementos finitos del montaje experimental del capítulo anterior. Se indican las principales características de este modelo, además de las propiedades utilizadas. En los resultados, se incluye, además, una comparación con los resultados experimentales. El análisis incorpora, por otro lado, un estudio paramétrico de aquellas variables que han sido identificadas como de posible injerencia en el comportamiento termo-mecánico de la interfaz.

El Capítulo 4 corresponde al desarrollo de una metodología que modifica el modelo analítico de transferencia de carga modificado por temperatura para pilotes, al contexto del problema analizado en los capítulos anteriores. Los resultados obtenidos de este trabajo, se comparan con los del modelo de elementos finitos y los experimentales. Además, como en el Capítulo 3, se incorpora un análisis de sensibilidad a ciertos parámetros, que son identificados como aquellos que podrían ejercer mayor efecto en el desarrollo de deformaciones irreversibles en la interfaz.

El Capítulo 5 elabora un ejemplo práctico de un pilote termo-activo donde el fenómeno de acumulación de deformaciones térmicamente inducidos puede observarse. Se estudian diferencias en los asentamientos bajo distintas configuraciones de pilote, e influencia de las condiciones de borde de temperatura. Además, se incluyen los resultados de la modelación, con su respectivo análisis. El Capítulo 6 corresponde a las conclusiones y principales recomendaciones de esta investigación.

2 Estudio Experimental

2.1 Montaje Experimental

El montaje experimental desarrollado se basa en el modelo conceptual de un pilote termo-activo que interactúa con el suelo principalmente mediante la fricción en la interfaz. Como se explica con mayor detalle en el Capítulo 4, los aumentos de temperatura generan expansiones o alargamientos del pilote, es decir deslizamientos relativos en la interfaz, pero que en la etapa de contracción no se recuperan en su totalidad debido al efecto combinado con el estado de cargas propio del diseño de estas estructuras. Este fenómeno sostenido en el tiempo, tras varios ciclos de temperatura, se va acumulando y se conoce como *ratcheting* (Alonso-Marroquín y Herrmann, 2004). En resumen, conceptualmente el problema a analizar tiene tres elementos principales: interacción entre dos superficies rugosas, existencia de ciclos de temperatura y estado crítico al deslizamiento por acción de cargas estáticas.

Con el propósito de tener un sistema que permita evidenciar el fenómeno de acumulación de desplazamientos térmicamente inducidos, se desarrolla un montaje experimental como se esquematiza en la Figura 1 y se muestra en la Figura 2. El objetivo es representar las condiciones críticas de desplazamiento que se podrían observar en una interfaz que es sometida a cambios de temperatura. Se utiliza un bloque de acrílico de 15x5x5cm, que a pesar de no ser un material típico de construcción de estructuras que se encuentre en contacto con el suelo, permite magnificar el fenómeno de expansión térmica debido a su alto coeficiente de expansión lineal. El bloque de acrílico se encuentra instalado horizontalmente sobre un depósito de arena limpia uniforme, silíceo, redondeada, con diámetro promedio de partículas $d_{50} = 1$ mm, coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 2^1 \text{ y gravedad específica de los sólidos } G_s=2.6.$$

¹ d_{60} y d_{30} (mm) diámetro del tamiz por el que pasa el 60% y el 30% del suelo, en peso, respectivamente

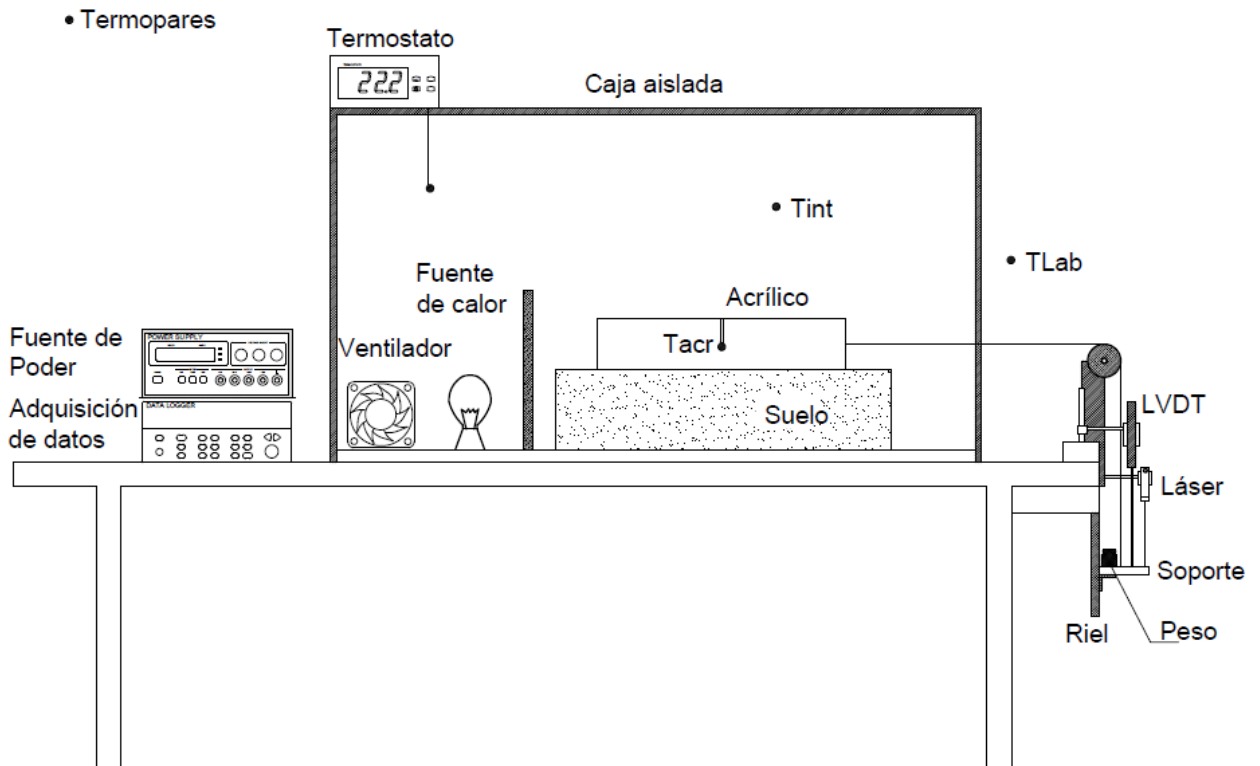


Figura 1. Esquema del montaje experimental



Figura 2. Montaje experimental. 1) cámara aislada térmicamente. 2) Sensores de desplazamiento LVDT y Láser. 3) Sistema de control y adquisición de datos y alimentación.

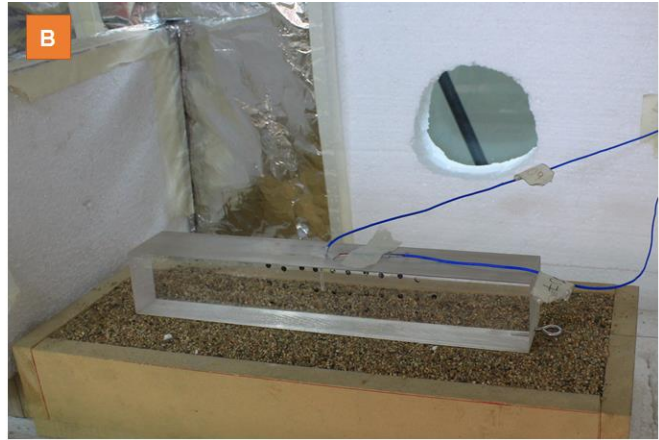


Figura 3. a) ampolletas y ventilador. b) bloque de acrílico sobre arena, con dos termopares, uno al interior y otro en la superficie

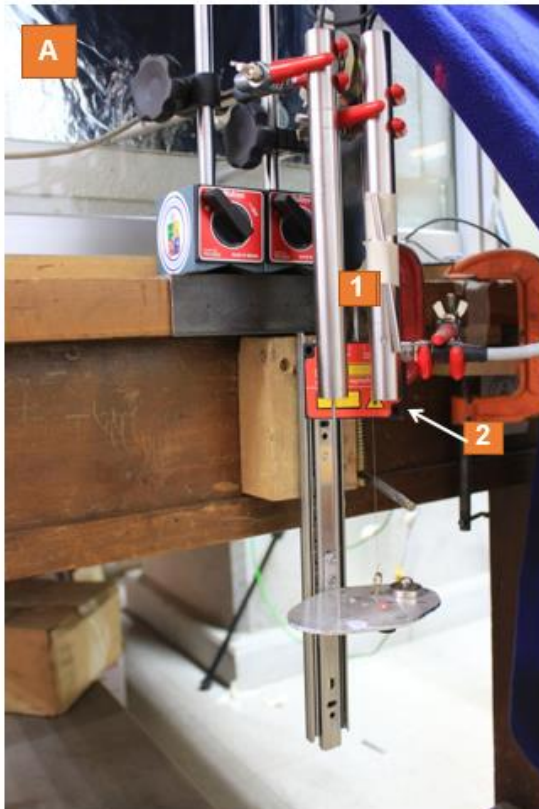


Figura 4. a) montaje sensores medición de desplazamiento. b) detalle de instrumentos utilizados: sensor LVDT (1) y Láser (2)

El bloque de acrílico se conecta a un peso que cuelga verticalmente, mediante un cable de bajo coeficiente de expansión térmica y un sistema de polea de muy bajo roce (punto 2 en la Figura 2). La estabilidad del sistema se define en base al Factor de Seguridad al deslizamiento FS_d , que se define como la relación entre la resistencia de la interfaz por fricción con la magnitud del peso que cuelga (Ecuación(1))

$$FS_d = \frac{\mu \cdot W_{acrílico}}{W_{sol}} \quad (1)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción de la interfaz suelo-acrílico (medida experimentalmente), $W_{acrílico}=0,89\text{kg}$ es el peso del acrílico y W_{sol} la magnitud del peso que cuelga, considerando el peso del vástago del sensor LVDT $W_s = 15\text{ g}$ y de la masa de magnitud variable W_m . El acrílico y el suelo se encuentran al interior de una cámara térmicamente aislada (Figura 3b) con control automático de temperatura.

Los ciclos de temperatura son desarrollados mediante un termostato cuyo sensor ubicado al interior de la cámara permite encender las ampollas incandescentes cuando la temperatura registrada es inferior a la mínima configurada, y apagarlas cuando la temperatura máxima definida se ha alcanzado (Figura 3a). La amplitud de los ciclos se regula a través del termostato, definiendo una temperatura mínima y una máxima. El periodo se modifica con la potencia de las ampollas utilizadas: a mayor potencia, el aumento de temperatura es más rápido, y por ende el periodo cambia. La temperatura al interior dependerá de estos factores, además de la conductividad térmica del material. A mayor amplitud de ciclos al exterior, mayor será la amplitud de los mismos al interior. Por otro lado, el periodo estará dado por la potencia de las ampollas principalmente; a mayor potencia, menor periodo puesto que el sistema obtendrá calor más rápido, sin embargo, esto también puede generar asimetrías en los ciclos al interior, puesto que la fase de enfriamiento no está bajo el mismo control que la fase de calentamiento. Otro factor que índice en los ciclos que se producen al interior, pero de menor manera, es la diferencia entre la temperatura mínima definida en el termostato, con la temperatura del laboratorio. Si esta última es muy similar a la temperatura mínima, la fase de enfriamiento será más lenta, ya que la transferencia de calor es menor, lo que se puede traducir en ciclos de temperatura con periodos ligeramente mayores a aquellos donde esta diferencia sea mayor.

Para evitar la radiación directa de las ampollas sobre el acrílico, se instala una barrera de material aislante (poliestireno expandido), y un ventilador (Figura 3a) para homogeneizar la temperatura al interior del contenedor. Se instala una serie de termopares, que miden la temperatura al centro (T_{acr} Figura 1) y en la superficie del acrílico (T_{sup} Figura 1) y al interior de la cámara (T_{int} Figura 1), sistema que permite

verificar la relación entre la temperatura al interior del acrílico con la configuración del termostato y potencia de ampollas. La temperatura en el laboratorio también se registra con un termopar ubicado fuera de la cámara, que permita corroborar la baja oscilación térmica que existe en el laboratorio. Para verificar que el montaje quede bien nivelado, se utiliza un nivel de burbuja.

Los desplazamientos horizontales del acrílico se miden directamente por medio de dos sensores. Un LVDT modelo DC-SE2000 Schaevitz Sensors, que permite medir desplazamientos relativos de hasta 20 cm y cuya resolución se ve limitada principalmente por el sistema de adquisición de datos (NI, 2012), y que en este caso entrega registros con 1×10^{-7} V de resolución (lo que es equivalente a aproximadamente 10^{-9} mm). El otro sensor utilizado es un distanciómetro láser de triangulación modelo optoNDCT ILD 1302-100 Micro-Epsilon con una resolución de 0,05 mm. Ambos sensores miden sobre un soporte anclado a un riel vertical que sostiene el peso (Figura 4a), cuya instalación evita variaciones de desplazamiento asociadas al balanceo del peso que cuelga verticalmente.

Los registros son almacenados en un computador, que se muestra en el punto 3 de la Figura 2. La alimentación de los sensores la realiza una fuente de poder Agilent modelo 3620A de 50W, mientras que el sistema de adquisición y registro de datos del LVDT y los termopares se realiza mediante un equipo Agilent modelo 34972. Los registros del sensor láser se transmiten por medio de un conversor análogo/digital modelo IF2004/USB Micro-Epsilon directamente al computador.

Debido a que el sensor LVDT entrega registros con una resolución mayor a la del sensor láser, los resultados entregados por este último se utilizan principalmente para verificar las mediciones del LVDT.

Si bien este sistema es capaz de medir desplazamientos producto de variaciones de temperatura en el acrílico, hay ciertas diferencias en esta configuración con la de un pilote termo-activo que deben ser consideradas.

- El sistema está horizontal, lo que no permite que la gravedad participe en los esfuerzos axiales a lo largo del bloque en contacto con suelo, esto genera una diferencia también en la distribución del esfuerzo de corte en la interfaz.
- El sistema solo se encuentra en contacto en una cara con el material granular, a diferencia de un pilote que se encuentra embebido y la cabeza es lo único que no está en contacto directo con suelo. Esto origina diferencias en la fuerza axial del bloque y en la de fricción en el contacto.
- La condición de borde de temperatura proviene del ambiente, y no del interior del acrílico, como se esperaría en un funcionamiento típico (ver Capítulo 5). Además, la transferencia de calor entre el aire y el acrílico (predomina convección) no es igual al del suelo y acrílico (predomina la conducción).

2.2 Metodología

Cada ensayo experimental consta de las siguientes etapas:

1. Configuración de sensores: la frecuencia de registro de los sensores se configura de la siguiente forma: el sensor láser mide en continuo a una frecuencia de 750 Hz, pero se guarda la media del registro durante un periodo de 5 segundos. El sensor LVDT registra un dato cada 5 segundos, al igual que los termopares. La temperatura máxima y mínima de los ciclos se especifica en el termostato. Para el correcto funcionamiento de este aparato, la temperatura mínima debe ser mayor o igual a la del ambiente.
2. Inicio de registros: se inician los registros de temperatura y desplazamiento con las ampolletas apagadas. Esto se realiza para corroborar que, bajo nula variación de temperatura, el desplazamiento medido es igualmente nulo.
3. Aumento de temperatura inicial: tras unos minutos en la etapa 2, el termostato ya configurado se enciende y la temperatura comienza a aumentar de manera sostenida hasta alcanzar la temperatura máxima del ciclo. Todo este proceso es registrado por los sensores.
4. Aplicación de ciclos de temperatura: Una vez alcanzada la temperatura máxima, el termostato apaga las ampolletas de manera que la temperatura comienza a descender. Una vez se llega a la temperatura mínima, el termostato vuelve a encender las ampolletas y se comienza la etapa cíclica. Esta etapa continúa por aproximadamente 20 horas.
5. Enfriamiento final: transcurridas las 20 horas, el termostato se apaga cuando está con las ampolletas apagadas, de manera que el sistema luego de alcanzar la temperatura mínima del ciclo, siga perdiendo calor. Esta etapa del ensayo dura aproximadamente 40 minutos, tiempo que permite alcanzar una temperatura más cercana a la inicial del ensayo.

La Figura 5 muestra un ejemplo de las mediciones de temperatura y desplazamiento durante cada una de las etapas de un ensayo experimental. En línea azul punteada y continua se muestran los registros de temperatura en la cámara y sobre el acrílico, respectivamente y en verde la temperatura al interior. En rojo se exhibe la temperatura medida en el laboratorio. Los desplazamientos registrados con el LVDT se muestran en línea negra.

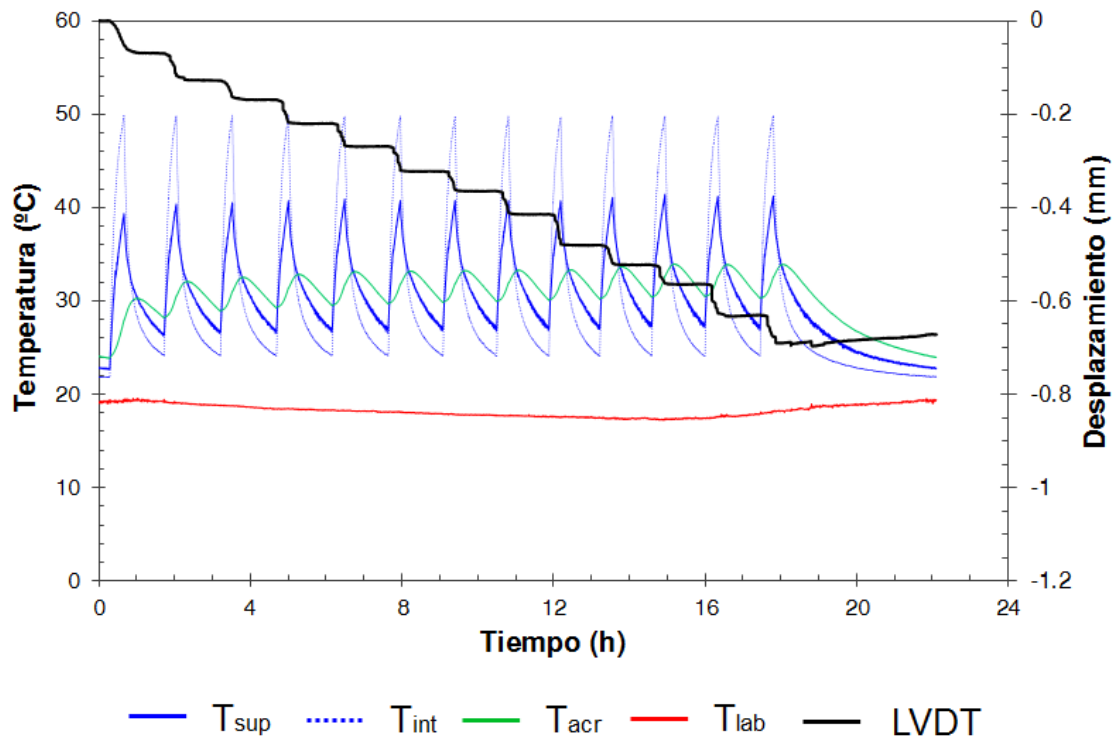


Figura 5. Registros obtenidos de un ensayo tipo. T_{sup} es la temperatura en la superficie del acrílico, T_{int} en la cámara, T_{acr} al interior del bloque, T_{lab} fuera de la cámara. La línea de color negro indica el desplazamiento medido con el sensor LVDT.

2.3 Programa de Ensayos

El objetivo de los ensayos es estudiar cómo influyen los ciclos de temperatura en el desarrollo de los desplazamientos, en particular el efecto del periodo y la amplitud de los ciclos. Si se considera la temperatura medida en la superficie del acrílico (T_{sup}), el periodo de los ciclos se modifica cambiando la potencia de las ampollitas, mientras que la amplitud configurando el termostato. Por otro lado, la amplitud y periodo de los ciclos medidos al interior no son proporcionales a los medidos al exterior, sin embargo, dependerán de éstos. Este efecto se explica por la transferencia de calor que ocurre al interior del bloque, que depende del tiempo que el bloque es sometido a cambios de temperatura (periodo de los ciclos en el exterior), como de la magnitud del cambio de temperatura al que es expuesto (amplitud de los ciclos en el exterior).

Asumiendo que los ciclos de temperatura son capaces de inducir acumulación de desplazamientos se establece la hipótesis de que la tasa de acumulación de desplazamientos es directamente proporcional a la amplitud de los ciclos de temperatura. Efecto se debe a que el deslizamiento se relaciona con la expansión térmica del acrílico, que es proporcional al incremento de temperatura. Por otro lado, se plantea la hipótesis de que el periodo de los ciclos de temperatura es inversamente proporcional a la tasa de acumulación de desplazamientos, fenómeno que se explica debido a que en un mismo periodo de tiempo ocurrirá una mayor cantidad de fases de calentamiento en el ensayo de menor periodo, lo que llevará a una mayor cantidad de deslizamientos relativos, traduciéndose en una mayor acumulación de desplazamientos.

Además de las características de los ciclos de temperatura, se considera como una variable relevante la magnitud del peso que tira del bloque, debido a que su variación se traduce en un cambio en el factor de seguridad al deslizamiento FS_d . Se busca comprobar que a menor factor de seguridad, la acumulación de desplazamientos es mayor, idea que se condice con los resultados mostrados por Nguyen et al., (2017); Pastén y Santamarina, (2014) y Yavari et al., (2016b) en pilotes termo-activos, donde aquellos que son sometidos a cargas mayores poseen mayores asentamientos cuando son sometidos a ciclos de temperatura.

Respecto de la rugosidad del material que se encuentra en contacto con el acrílico, se busca comprobar que mientras el factor de seguridad sea constante, la rugosidad de la interfaz suelo-acrílico no tiene incidencia en la tasa de acumulación de deformaciones.

Considerando las hipótesis elaboradas, se diseña un programa de ensayos que contempla los siguientes puntos:

- Caso base: que corresponde al ensayo con el que se realizarán comparaciones con el objetivo de poder establecer si las hipótesis se cumplen.
- Ensayos con distinta amplitud de ciclos de temperatura (FS2-1.5C-0.9H, FS2-3C-1.4Hy FS2-6C-1.8H): las temperaturas máxima y mínima definidas en el termostato definen la amplitud de los ciclos de temperatura en la cámara. La elección de los valores límites se hace considerando condiciones operacionales de pilotes termo-activos (amplitudes), y las limitaciones del montaje (la temperatura mínima debe ser mayor a la temperatura del ambiente para asegurar que el termostato se volverá a encender tras cada fase de enfriamiento).
- Ensayos con distintos periodos de ciclos de temperatura (FS2-6C-1.8H y FS2-6.2C-3.3H): utilizar distintas ampollitas permite modificar el periodo de los ciclos de temperatura. Sin embargo, también varía la amplitud de los ciclos de temperatura medidos al interior del acrílico (a mayor periodo, se logra calentar o enfriar más el bloque, efecto que no es posible desacoplar si la condición de borde de temperatura proviene desde el exterior).
- Ensayos con distintos FS (FS1.5, FS2, FS12): con el objeto de corroborar la influencia del factor de seguridad en el desarrollo de los desplazamientos relativos en la interfaz, se realizan ensayos con diferentes cargas, manteniendo constante las condiciones de temperatura del sistema.
- Ensayo con distinta rugosidad (FS2-7C-2.2HLija): se realiza un ensayo en una superficie cuyo coeficiente de fricción con el acrílico es distinto al coeficiente de roce acrílico-arena, manteniendo constante factor de seguridad al deslizamiento y las condiciones de temperatura.

El resumen de los ensayos realizados se muestra en la Tabla 1. El nombre de cada ensayo entrega información de sus características. El prefijo “FS” corresponde al factor de seguridad al deslizamiento del sistema. Las otras dos secciones, indican la amplitud y el periodo promedio de los ciclos de temperatura medidos en el interior del acrílico, acompañados de las letras C y H, respectivamente. El último ensayo indicado en la tabla, se realiza cambiando el suelo arenoso por una superficie de distinta rugosidad, de tal manera de estudiar la influencia del coeficiente de fricción de la interfaz en la acumulación de desplazamientos. La superficie seleccionada corresponde a una lija #800 (muy fina).

2.4 Resultados

De los resultados obtenidos (Figura 6 hasta Figura 11), se realiza un ajuste lineal una vez la temperatura media de los ciclos es constante. Es decir, se traza una recta, y la influencia que tengan las distintas características de los ciclos y cargas en el comportamiento, se analizarán en función de la pendiente de ésta, asociada a cada ensayo.

Tabla 1. Ensayos de laboratorio

Nombre Ensayo	ΔT_{sup} ($T_{m\acute{a}x.} - T_{m\acute{i}n.}$)	FS	Periodo Medio	Observaciones
FS2-1.5C-0.9H	1,5°C(31,5°C – 30°C)	2	0,9 h	
FS2-6C-1.8H	6°C(37°C – 31°C)	2	1,8 h	
FS2-3C-1.4H	3°C(33,5°C – 30,5°C)	2	1,4 h	
FS2-6.2C-3.3H	6,2°C(33°C – 26,8°C)	2	3,3 h	
FS12-5.6C-3.3H	5,6°C(33°C – 27,4°C)	12	3,3 h	
FS1.5-5.3C-2.8H	5,3°C(33,4°C – 28,1°C)	1,5	2,8 h	
FS2-3.2C-1.2H	3,2°C(47°C – 43,8°C)	2	1,2 h	
FS2-7C-2.2HLija	7°C(38°C – 31°C)	2	2,2 h	Ensayo sobre lija
FS2-5C-3.1HL	5°C(33°C – 28°C)	2	3,1 h	Duración 74 horas

La extensión de la zona de comportamiento no lineal asociado al calentamiento inicial y la de comportamiento lineal, depende del tiempo que demore el ensayo en estabilizar la temperatura media de los ciclos de temperatura al interior del acrílico, fenómeno que se relaciona con el periodo de los ciclos, y con la conductividad térmica del material.

En la Figura 6, se muestran ensayos que tienen amplitud y periodo de los ciclos similares, pero de distinta temperatura media. En estos resultados se observa que la zona de comportamiento lineal difiere, y la extensión de esta dependerá del tiempo que el ensayo tome para estabilizar su temperatura media. La Figura 6a exhibe un comportamiento lineal desde aproximadamente las 4 horas, a partir del segundo ciclo de temperatura, mientras que la Figura 6b muestra comportamiento lineal desde prácticamente el inicio del test. Sin embargo, las pendientes no son significativamente diferentes.

El comportamiento lineal que se observa en estos ensayos (Figura 6), que difiere de lo observado en pilotes termo-activos, se explica por la ausencia de resistencia de punta, que limita la tasa de acumulación de desplazamientos al largo plazo.

Con el objeto de corroborar la tendencia lineal del comportamiento, se ejecuta un ensayo de 74 horas de duración, que se muestra en la Figura 7. Realizando un ajuste lineal de la curva de desplazamiento en el tiempo, se obtiene un coeficiente de correlación R^2 igual a 0,99, lo que ayuda a sostener la hipótesis de que el fenómeno de acumulación de desplazamientos se mantiene linealmente en el tiempo para el rango de temperaturas seleccionado.

Para analizar la influencia de los parámetros señalados en la sección anterior, se utiliza la pendiente de la recta que representa la tasa de acumulación de desplazamientos y representa el comportamiento lineal como medio de comparación entre las diferentes pruebas experimentales.

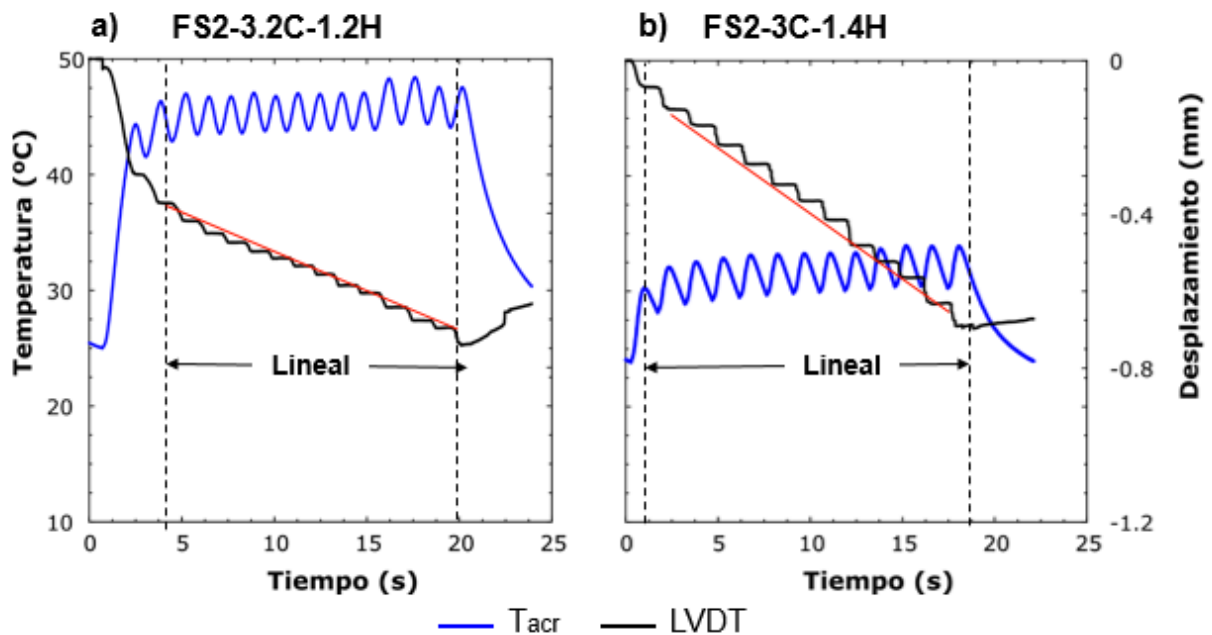


Figura 6. Ensayos experimentales tipo, que evidencian la influencia del tiempo en alcanzar la estabilización de la temperatura media de los ciclos en la linealidad de la acumulación de desplazamientos en el tiempo. La línea de color rojo representa la mejor recta que describe los desplazamientos en el tiempo. T_{acr} es la temperatura medida al interior del acrílico, LVDT corresponde al registro de desplazamientos obtenidos por este sensor. a) Es el ensayo que tarda más tiempo en estabilizar su temperatura media, por lo que su fase cíclica o lineal comienza después que el ensayo en b).

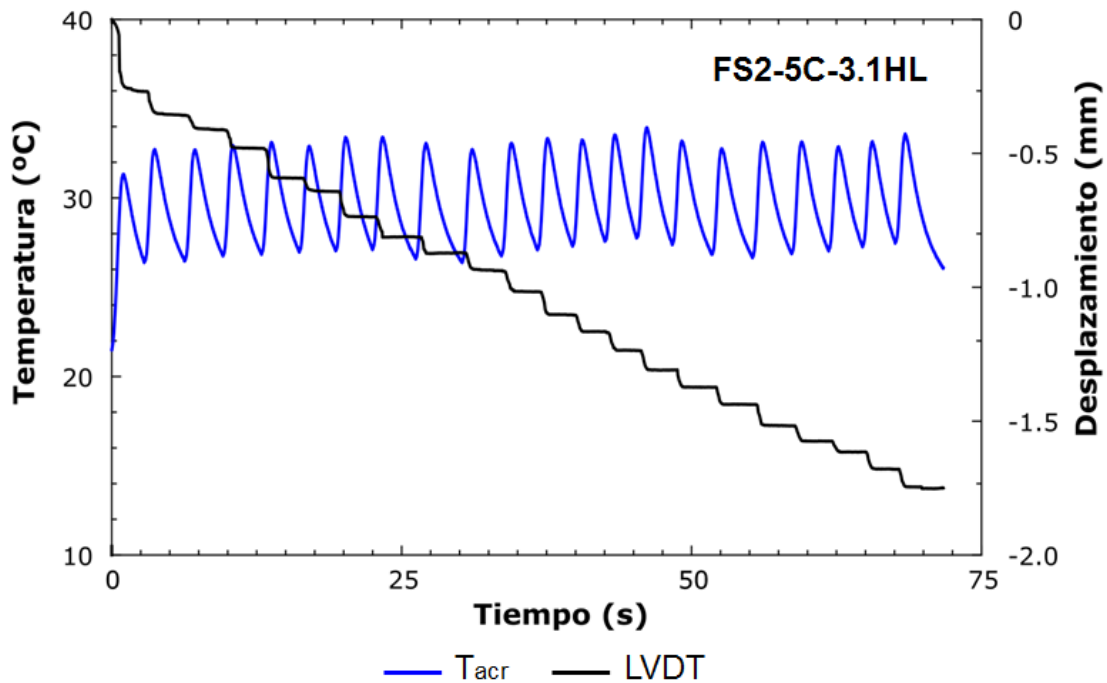


Figura 7. Ensayo de larga duración, que muestra la tendencia lineal del comportamiento en el largo plazo.

La Figura 8 muestra la influencia que tiene en la acumulación de desplazamientos el periodo y amplitud de los ciclos de temperatura medidos al interior del acrílico. Los resultados son consistentes con la hipótesis que sostiene que, manteniendo el mismo factor de seguridad, el periodo es inversamente proporcional a la tasa de acumulación de desplazamientos (dejando la amplitud constante), y que la relación entre la amplitud y la acumulación de desplazamientos es directa (dejando el periodo constante), sin embargo, es importante destacar que al analizar los ciclos del temperatura al interior del bloque, no se puede desacoplar el periodo y la amplitud, puesto que al modificar un factor, ya sea la amplitud o periodo de los ciclos por separado, al interior varían ambas características. El test de la Figura 8a es del de menor amplitud ($1,5^{\circ}\text{C}$), y es el que posee la recta de menor pendiente de los tres ensayos que se muestran. El ensayo que se muestra en la Figura 8c, por su parte, es aquel que posee una tasa de acumulación de desplazamientos mayor, siendo el ensayo que posee una mayor amplitud (6°C).

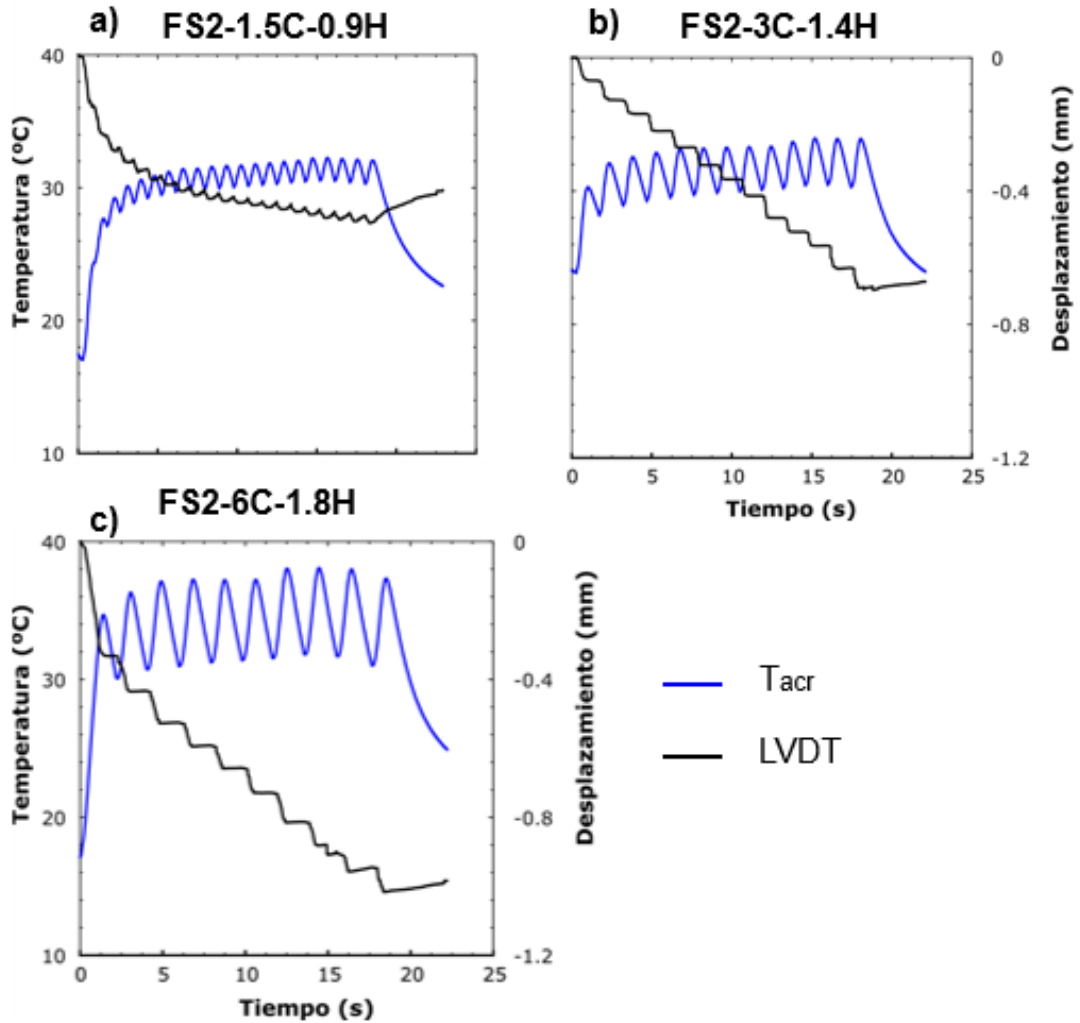


Figura 8. Resultados experimentales que reflejan la influencia de los ciclos de temperatura en el fenómeno de acumulación de desplazamientos. T_{acr} corresponde a la temperatura al interior del acrílico y LVDT al registro del sensor.

En la Figura 9, se muestran dos ensayos cuyas amplitudes son similares, pero que difieren en el periodo y la temperatura media de los ciclos. El test de la Figura 9a tiene el menor periodo (0,9 horas) y la mayor tasa de acumulación de desplazamiento, resultado que es consistente con la hipótesis mencionada con anterioridad. Al igual que lo mostrado en la Figura 6, la diferencia en las temperaturas medias, genera que el tiempo en alcanzar su estabilización incida en la linealidad del comportamiento observado, donde la prueba que se muestra en la Figura 9a exhibe un comportamiento lineal recién en el segundo ciclo hacia adelante.

En la Figura 10 se muestran los resultados de tres ensayos experimentales realizados con condiciones similares de temperatura, pero con distintos factores de seguridad al deslizamiento. Estos resultados demuestran, que, al igual que en los estudios realizados en pilotes termo-activos (Nguyen et al., 2017, Pastén y Santamarina, 2014, Vieira y Maranhá, 2016, Yavari et al., 2014, 2016), la tasa de acumulación de desplazamientos es inversamente proporcional al Factor de Seguridad. También se puede concluir que inclusive para cargas muy pequeñas ($FS=12$), se desarrollan desplazamientos irreversibles. Si bien los periodos son ligeramente diferentes en cada uno de los ensayos, y al no observar consistencia entre este parámetro y los resultados como sí se había observado en la Figura 9, se estima que la influencia que tiene este factor para este caso particular es muy bajo y puede ser despreciada esta diferencia en los periodos.

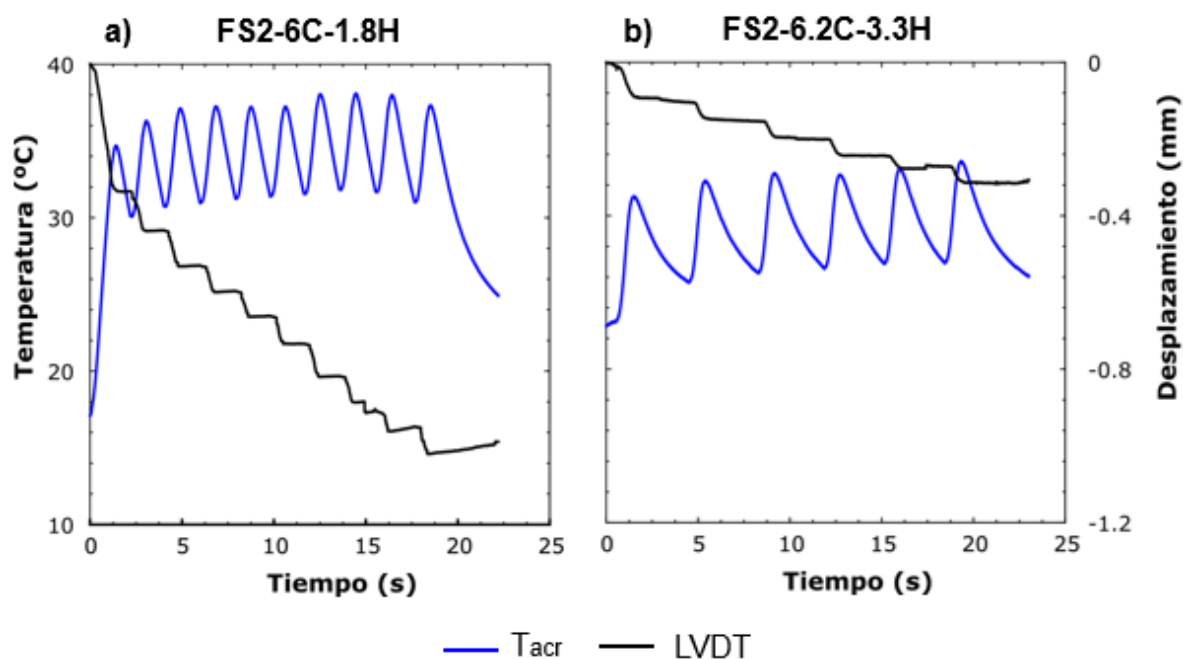


Figura 9. Resultados experimentales que muestran la influencia del periodo de los ciclos en la acumulación de desplazamientos.

En la Figura 11 se exhiben los resultados de ensayos realizados con distintas rugosidades, pero con idéntico factor de seguridad al deslizamiento. La hipótesis de que el factor de seguridad predomina sobre la rugosidad de la interfaz se verifica, observando que ambos ensayos presentan tasas de acumulación de desplazamiento muy similares, y cuyas diferencias son explicadas por las ligeras diferencias que hay en el periodo de los ciclos de temperatura de ambas pruebas entre las 2 y 7 horas de ensayo.

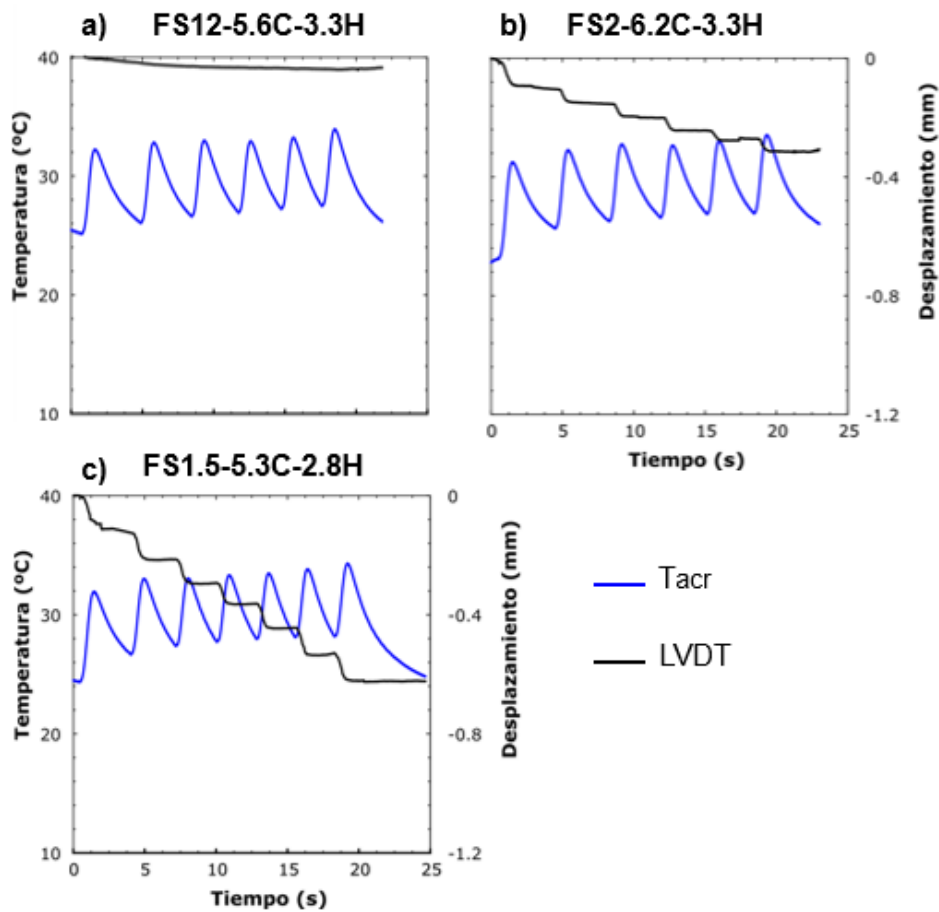


Figura 10. Influencia del factor de seguridad al deslizamiento en el fenómeno de acumulación de desplazamientos.

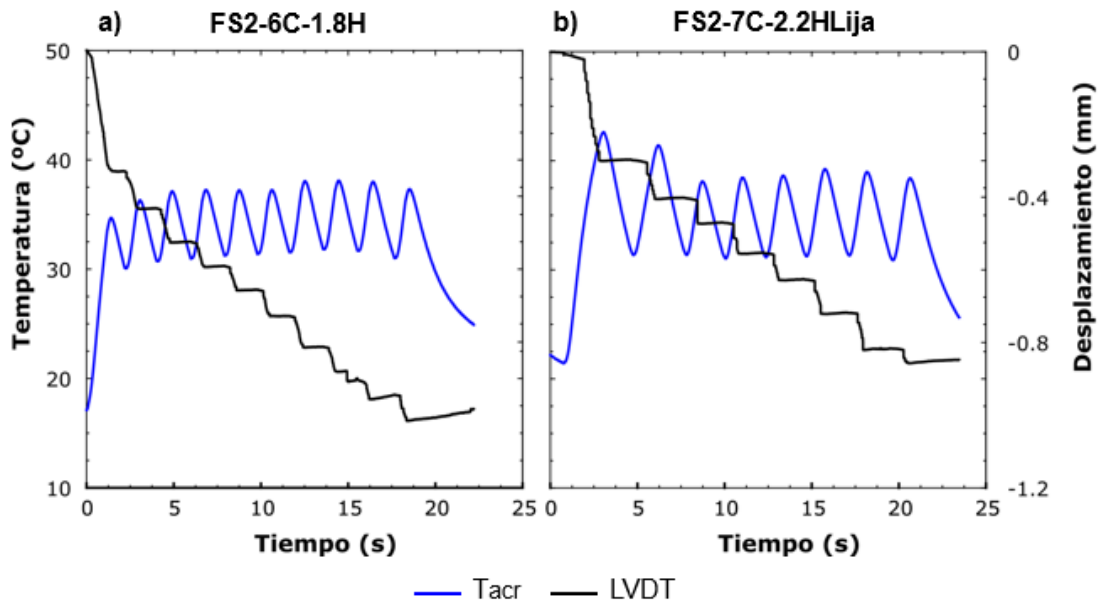


Figura 11. Resultados experimentales de ensayos sobre distintas superficies bajo el mismo factor de seguridad al deslizamiento.

3 Modelamiento Numérico

3.1 Consideraciones teóricas

Con el objetivo de verificar los resultados obtenidos experimentalmente, se desarrolló un modelo en elementos finitos con el software Abaqus (Abaqus, 2013), que permite acoplar el fenómeno de transferencia de calor con el comportamiento mecánico del sistema.

El principal mecanismo de transferencia de calor en este tipo de problemas es el de conducción, donde el flujo de calor al interior de un dominio tridimensional es descrito mediante la Ley de Fourier (Thomas y Rees, 2009).

$$\mathbf{q} = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k} \right) \quad (2)$$

Donde λ [W/K m] es la conductividad térmica del material, \mathbf{i} , \mathbf{j} y \mathbf{k} son los vectores unitarios en las direcciones x,y y z, y \mathbf{q} [J] el calor.

La variación sostenida de temperatura de forma cíclica, representa un problema transitorio, que en ausencia de generación de calor dentro del medio está gobernada por la ecuación de difusión de calor:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

El parámetro ρ [kg/m³] es la densidad del sólido, mientras que c [J/kg · K] su calor específico.

Abaqus desarrolla el principio de trabajo virtuales, que corresponde a la base del método de elementos finitos (Sheng et al., 2007), con el propósito de transformar un problema no lineal en una serie de problemas lineales. En problemas donde hay contacto entre dos superficies, como es el caso del acrílico sobre la arena, no debe existir interpenetración entre los elementos de ambos objetos. El desplazamiento relativo en la dirección normal, o el espacio que existe entre las superficies (*gap*) g_n , puede ser igual o mayor a cero dependiendo del esfuerzo normal de contacto.

$$g_n = \begin{cases} 0 & \text{si } \sigma_n > 0 \\ > 0 & \text{si } \sigma_n = 0 \end{cases} \quad (4)$$
$$g_n \sigma_n = 0$$

Para el modelamiento tangencial del contacto entre las superficies, usualmente se utiliza la ley Mohr-Coulomb, cuyas restricciones tangenciales pueden ser descritas como se muestra en la Ecuación (5).

$$g_t = \begin{cases} 0 & \text{si } \mu\sigma_n - |\sigma_t| > 0 \\ > 0 & \text{si } \mu\sigma_n - |\sigma_t| = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$g_t(\mu\sigma_n - |\sigma_t|) = 0$$

Donde g_t es el desplazamiento relativo o gap tangencial, σ_t el esfuerzo tangencial en el contacto y μ el coeficiente de fricción. Los desplazamientos relativos en la dirección normal y tangencial representan dos nuevas incógnitas en el problema, y existen varios criterios para determinarlos. En este estudio, se utiliza el método de penalización (*penalty* en inglés), que asume que existe una relación directa de proporcionalidad entre las fuerzas normales y tangenciales con los desplazamientos relativos.

$$\sigma_n = \epsilon_n g_n$$

$$\sigma_t = \begin{cases} \epsilon_t g_t & \text{para adherencia} \\ \mu\sigma_n & \text{para deslizamiento} \end{cases} \quad (6)$$

ϵ_n y ϵ_t corresponden a parámetros de penalización, que pueden ser reconocidos como una rigidez del contacto asociada a un comportamiento elástico en caso de la dirección normal, y uno elástico perfectamente plástico en el caso de la dirección tangencial.

El acoplamiento del fenómeno térmico y mecánico, se debe realizar cuando se tienen fenómenos asociados a disipación de energía en forma de calor por fricción, lo que en el caso del montaje experimental descrito en el capítulo anterior puede ser despreciado. En conclusión, cuando estos procesos no se consideran, el problema térmico y mecánico son resueltos de manera separada (Wriggers, 2006), lo que para efectos de este trabajo, se consigue definiendo la generación de calor por fricción como nula.

3.2 Modelo de elementos finitos

El modelo construido corresponde a una representación tridimensional del montaje experimental como se muestra en la Figura 12. Tanto el acrílico como el bloque de arena son esquematizados mediante dos prismas, y las propiedades termo-elásticas de los materiales se definen como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de parámetros del modelo de elementos finitos

Parámetro	Unidades	Acrílico	Arena
Densidad ρ	kg/m ³	1180	1475
Razón de Poisson ν	-	0,33	0,3
Módulo de elasticidad E	Pa	$2,5 \times 10^9$ ⁽¹⁾	$6,0 \times 10^7$ ⁽¹⁾
Coefficiente de expansión térmica α	1/°C	$6,0 \times 10^{-5}$ ⁽²⁾	0
Conductividad térmica κ	W/m ² K	0,19 ⁽²⁾	0,4
Capacidad térmica C	J/kg K	1500 ⁽²⁾	2000 ⁽³⁾
Difusividad térmica	m ² /s	1.07×10^{-7}	$1,35 \times 10^{-7}$

(1) Saggu y Chakraborty (2015a)

(2) Datos Metacrilato PMMA

(3)VDI (2004)

La discretización del bloque inferior está hecha de elementos cúbicos de arista 1cm, mientras que la del superior de 0,5cm, diferencia que no afecta los resultados finales. De acuerdo a Saggu y Chakraborty (2015a), se debe realizar un refinamiento de la malla cerca de la interfaz; sin embargo, este procedimiento aumenta de manera significativa el uso de los recursos computacionales y el tiempo de ejecución del modelo.

Considerando esto, y con el objeto de cuantificar el error que se puede obtener del uso de una malla más gruesa, se comparan los resultados de un análisis con malla más fina en el acrílico y suelo en la zona cerca a la interfaz (Figura 12b). El tamaño de los elementos en las zonas donde la malla ha sido refinada, va de 0,2cm a 0,5cm en el acrílico, y de 0,5cm en el suelo.

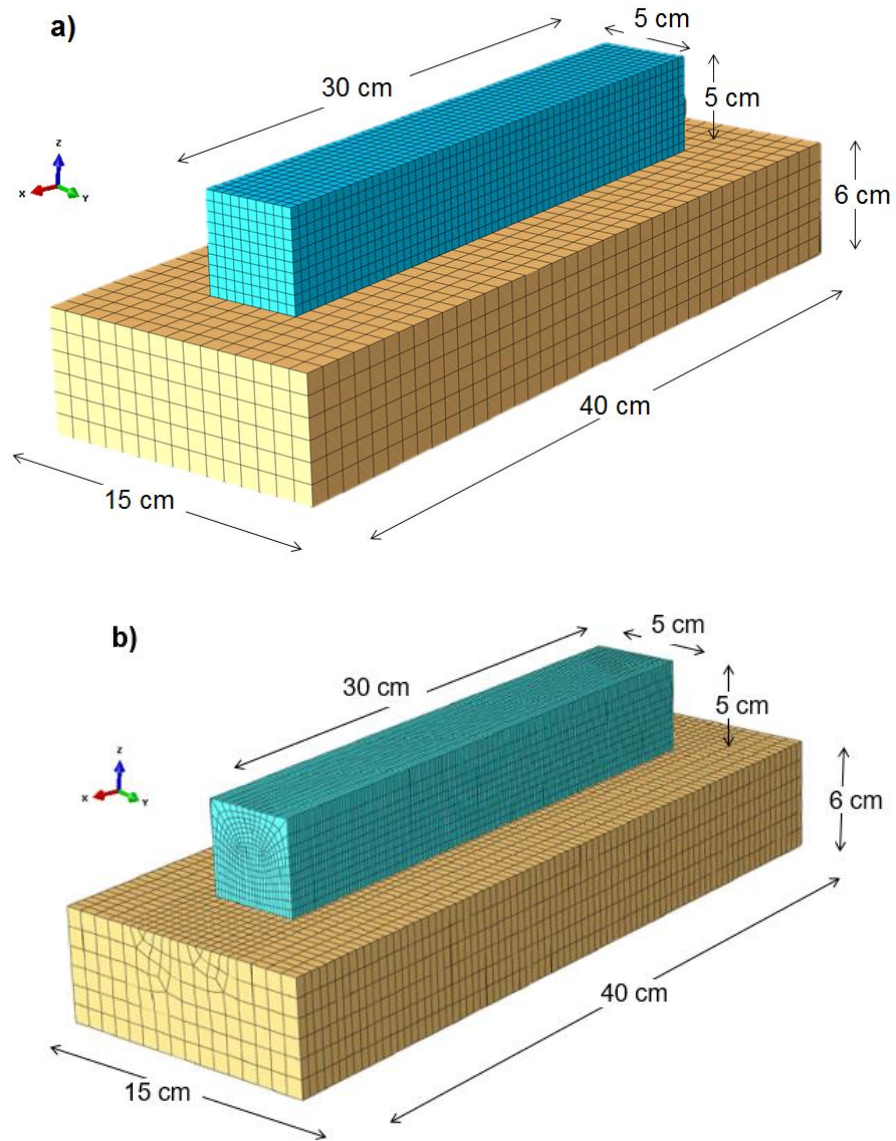


Figura 12. Dimensiones y malla del modelo de elementos finitos. a) Corresponde al mallado utilizado en todos los modelos de elementos finitos y b) la malla para el análisis del efecto del tamaño de los elementos.

Los resultados permiten observar que, a pesar de que los resultados difieren, esto ocurre en un porcentaje que va aumentando con el número de ciclos, por lo que, para la duración de las pruebas de este estudio, el error no supera el 20%, y el aumento del tiempo de ejecución en casi 30 veces no se justifica.

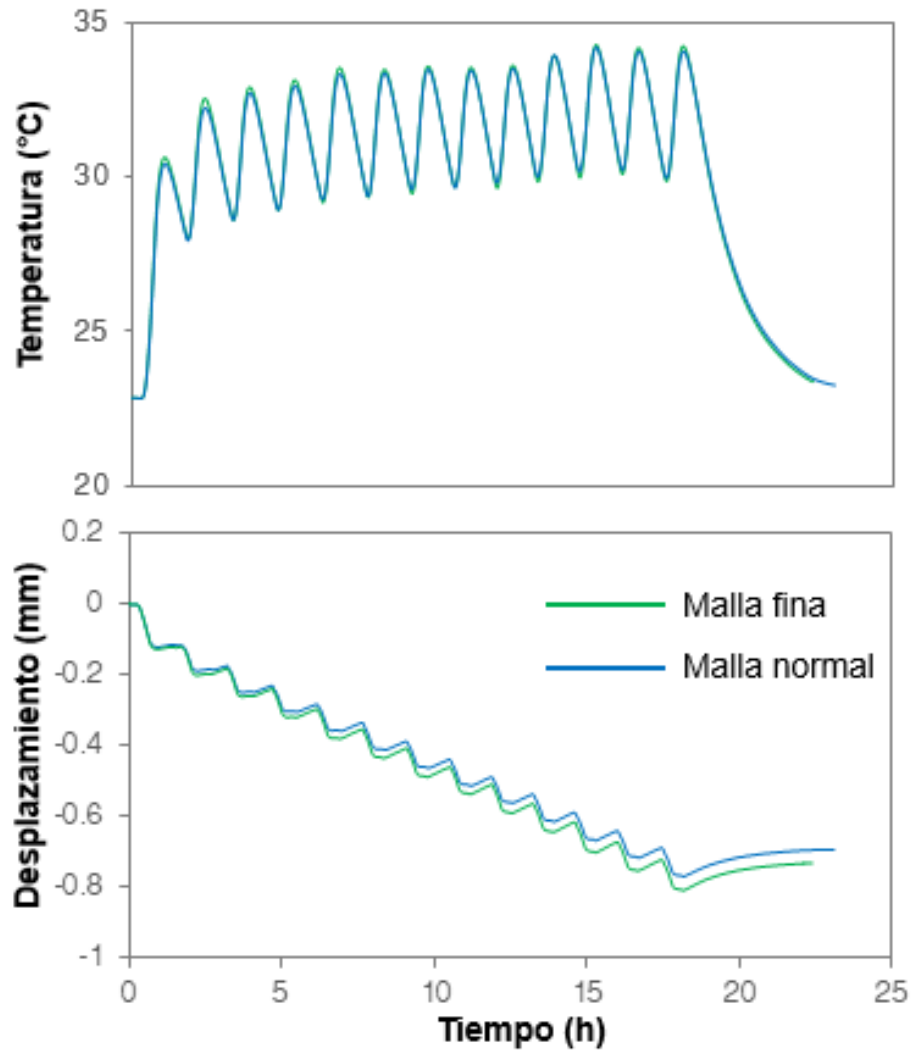


Figura 13. Resultados para el modelamiento en elementos finitos de un ensayo experimental, resultados para la ejecución del modelo en malla fina y malla normal.

Los elementos utilizados en este modelo corresponden a bloques de 8 nodos, de integración reducida a un punto de integración y que permiten acoplamiento de desplazamiento y temperatura (C3D8RT). En la interfaz se define un contacto cuyo comportamiento en la dirección tangencial se define como elástico perfectamente plástico, donde el desplazamiento elástico se adopta como $1 \times 10^{-5} \text{m}$, estimado desde los ensayos de Martínez y Frost (2016) y Potyondy (1961). El contacto en la dirección tangencial se caracteriza mediante un coeficiente de roce $\mu [-]$, que para este caso se determina experimentalmente y su valor es de 0,27. Para obtener dicho valor, se utilizan distintos pesos colgantes hasta comenzar a deslizar el bloque de acrílico, y, asumiendo el inicio del movimiento como el caso más crítico ($FS=1$), el coeficiente de roce se determina. Además, el contacto en la dirección normal se define con un comportamiento lineal elástico, cuya rigidez es igual a 10GPa, valor estimado en base al módulo de deformación del material más rígido y verificando la interpenetración de las mallas de ambos bloques. El fenómeno de transferencia de calor entre ambas superficies se modela mediante una interacción térmica, caracterizada por los valores de conductividad térmica en función del *gap* o espacio que existe entre ambas superficies. El valor de la conductividad térmica cuando el *gap* es nulo, se define como la conductividad del suelo, cuando el *gap* es distinto de cero, se utiliza la conducción del aire (Saggu y Chakraborty, 2015).

Las condiciones de borde que definen el problema son las siguientes:

- Restricción de desplazamientos en todas las direcciones, en las caras laterales e inferior del bloque que representa la caja de arena.
- Aplicación de una presión negativa en una de las caras laterales del acrílico, simulando una fuerza constante equivalente al peso que tira del bloque en el ensayo experimental. Al igual que en el montaje, se aplica antes de iniciar los ciclos de temperatura.
- Condición de borde de temperatura que cambia en el tiempo. Para ello se utiliza el registro del termopar que se sitúa en el borde del acrílico en el montaje experimental

La Figura 14 muestra las superficies donde son aplicadas las distintas condiciones de borde.

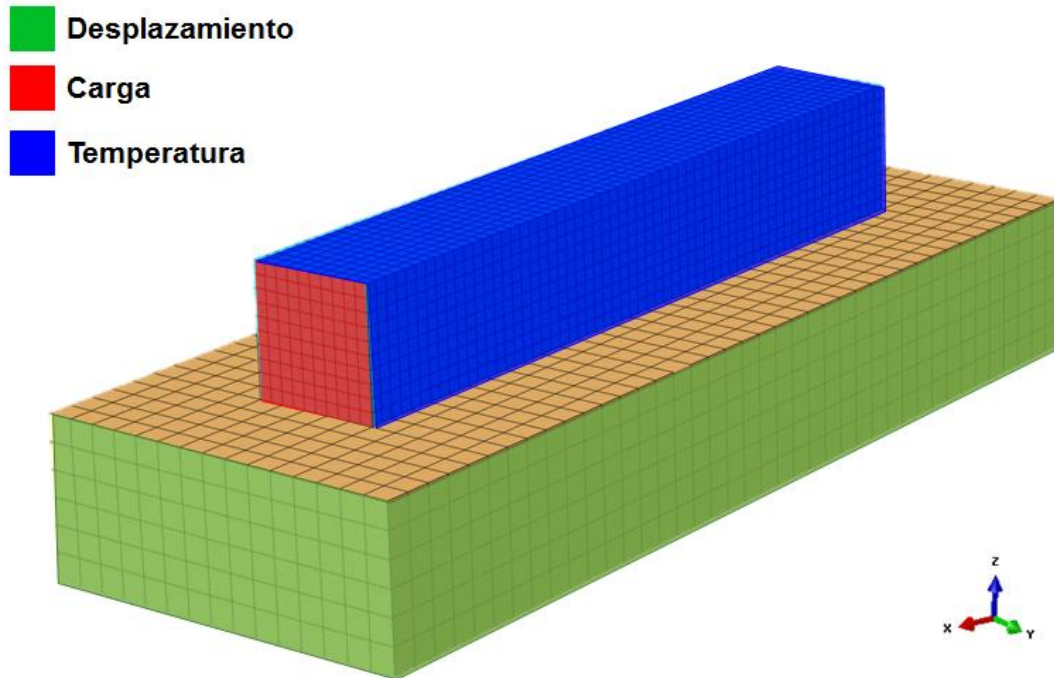


Figura 14. Superficies donde se aplican las distintas condiciones de borde del problema

Para corroborar que la condición de borde de temperatura es la adecuada, se mide la temperatura en un nodo del modelo que se muestra en la Figura 14 al interior del acrílico, para así comparar estos valores con los registros obtenidos del termopar que se encuentra al interior del acrílico en el montaje experimental. Los parámetros térmicos del suelo y acrílico que se muestran en la Tabla 2 corresponden a aquellos que, con la condición de borde utilizada, permiten reproducir el fenómeno de transferencia de calor hacia el interior del bloque de acrílico y que además son consistentes con las características de los materiales seleccionados. En la Figura 15 se presenta la comparación de la temperatura medida al interior del acrílico con el termopar y en el modelo numérico respectivo en un nodo al interior. Estos resultados muestran que las diferencias son mínimas y que la combinación de condición de borde y los parámetros térmicos adoptados permiten reproducir de manera satisfactoria el fenómeno.

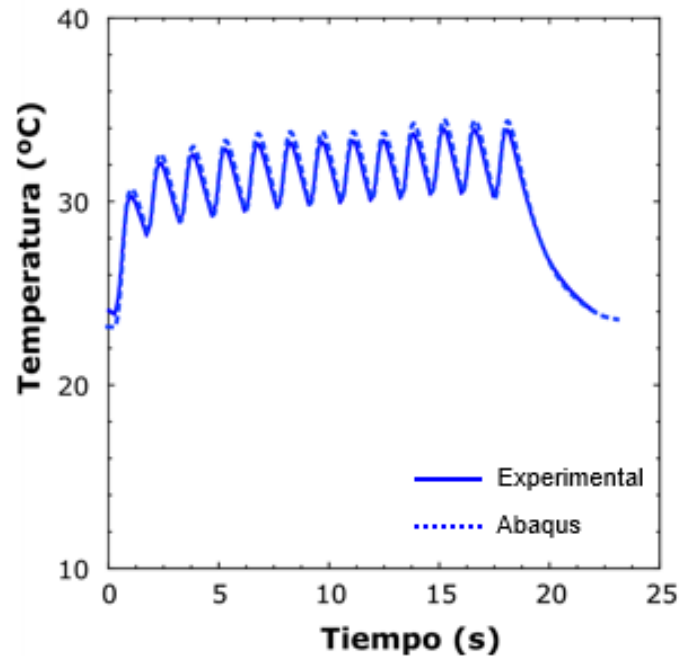


Figura 15. Comparación de la temperatura al interior del acrílico (T_{in}) obtenidas del registro con el termopar, y de la medición en el nodo al centro del modelo de elementos finitos.

3.3 Modelamiento de Ensayos de Laboratorio

Los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos corresponden al registro en el tiempo de la temperatura en el centro del acrílico (nodo interior), y el desplazamiento de un nodo en el borde del acrílico, medida análoga al registro del sensor LVDT.

Este procedimiento se repite con todos los ensayos realizados, a modo de demostrar que el modelo valida los resultados obtenidos en laboratorio, pero también para establecer si la caracterización de los materiales y de la interfaz es adecuada.

Al comparar los resultados de la modelación numérica con los experimentales de aquellos ensayos que se utilizan para analizar la influencia de la temperatura media (Figura 16), lo primero que se puede observar es que el modelo tiene un comportamiento lineal desde el principio del ensayo, en otras palabras, no se observa el inicio no lineal de los resultados experimentales, independiente de la condición de estabilización de la temperatura media de los ciclos al interior del acrílico, esto es consistente con la caracterización de los materiales realizada. Por otro lado, a pesar de representar de manera satisfactoria la parte térmica del ensayo, los desplazamientos en el tiempo tienen un comportamiento ligeramente distinto, donde la principal diferencia el retroceso observado en los modelos en la fase de enfriamiento, lo que no se observa en los resultados experimentales, salvo el ensayo FS2-1.5C-0.9H. Sin embargo, los resultados finales son bastante similares, lo que permite afirmar que la caracterización es adecuada y que permite representar de manera aceptable el fenómeno observado en laboratorio.

En la Figura 17, se presentan los resultados de la modelación de los test que se utilizaron en el análisis de la influencia de la amplitud y periodo de los ciclos. Las tasas de acumulación de desplazamientos se aproximan en base a la mejor recta que describe el comportamiento en el tiempo, para el test con menor periodo (0.9 horas) la tasa es aproximadamente de 0.01 mm/h, mientras que para el ensayo que tiene mayor periodo y mayor amplitud de los ciclos (FS2-6C-1.8H) la tasa es 0.038 mm/h. Se puede observar de estos resultados que, a mayor periodo y amplitud, mayor es la tasa de acumulación de desplazamientos, hipótesis que también había sido corroborada con los resultados experimentales.

Apoyando esta idea, en la Figura 18, se muestra que con ciclos de temperatura de amplitud comparable, aquellos ensayos con mayor periodo son los que acumulan desplazamientos a una tasa inferior.

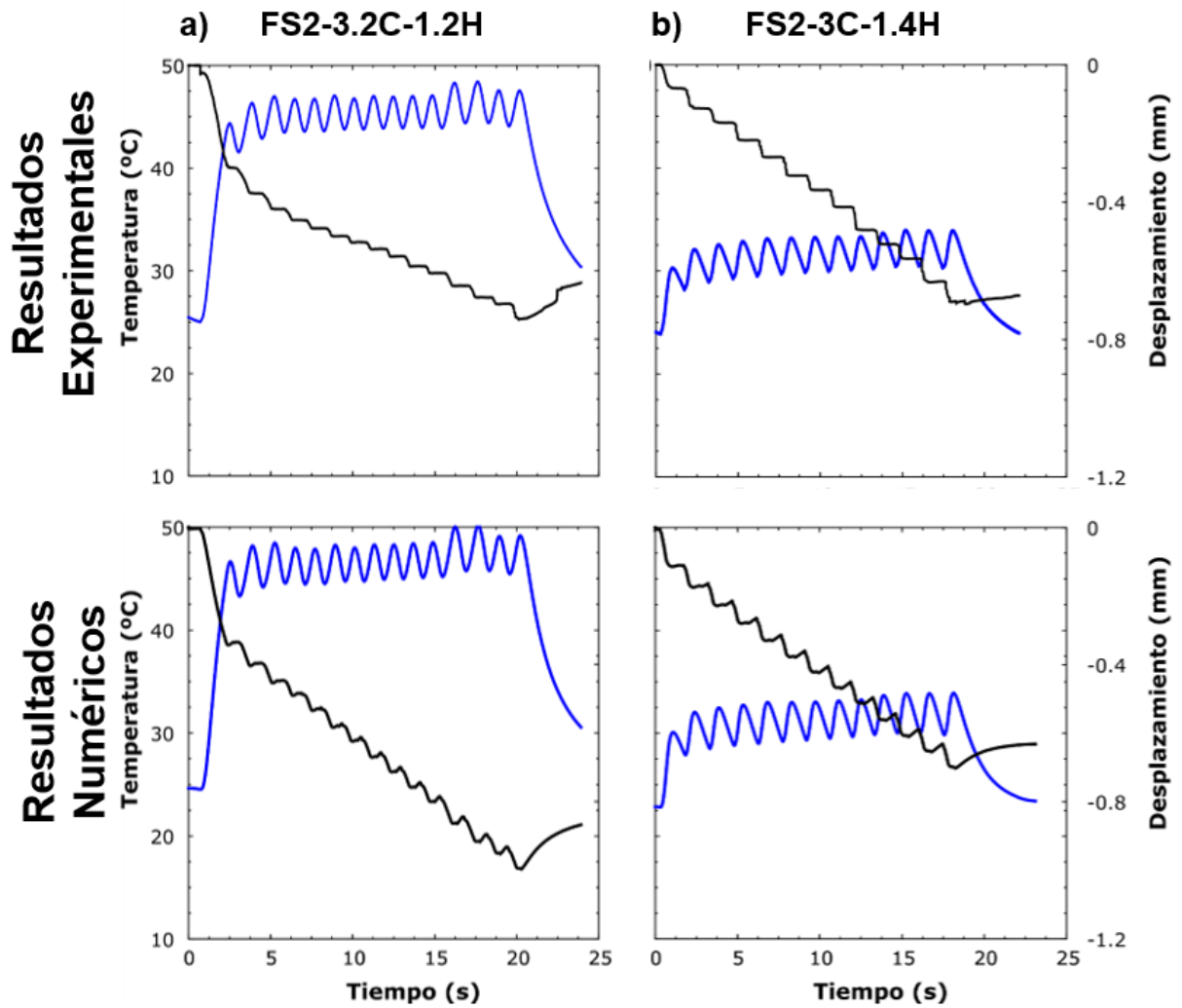


Figura 16. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia de la temperatura media. Curva color negro corresponde a los desplazamientos, de color azul la temperatura al interior del acrílico. a) ensayo con una temperatura media de aproximadamente 45°C. b) ensayo con temperatura media de aproximadamente 30°C.

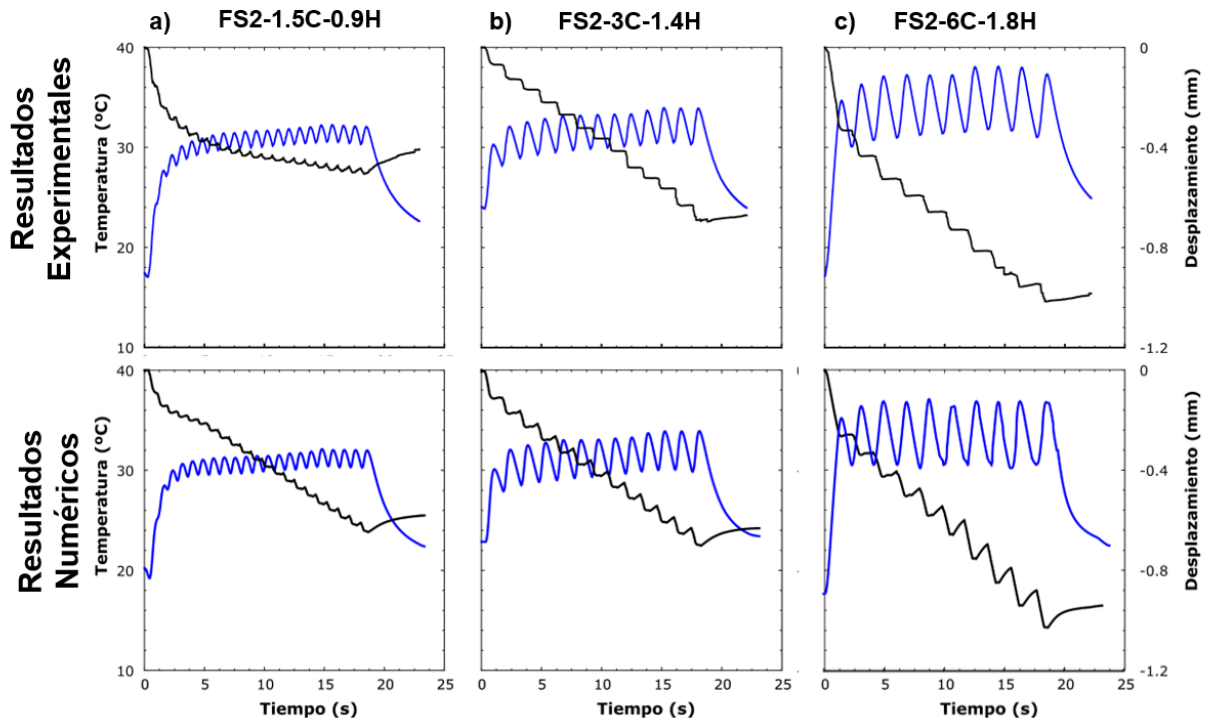


Figura 17. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia de la amplitud y periodo de los ciclos de temperatura. a) ensayo con menor amplitud y menor periodo. b) ensayo con amplitud y periodo intermedios. c) ensayo con amplitud y periodo mayores. Curva de color negro corresponde a los desplazamientos, en azul la temperatura al interior del bloque de acrílico.

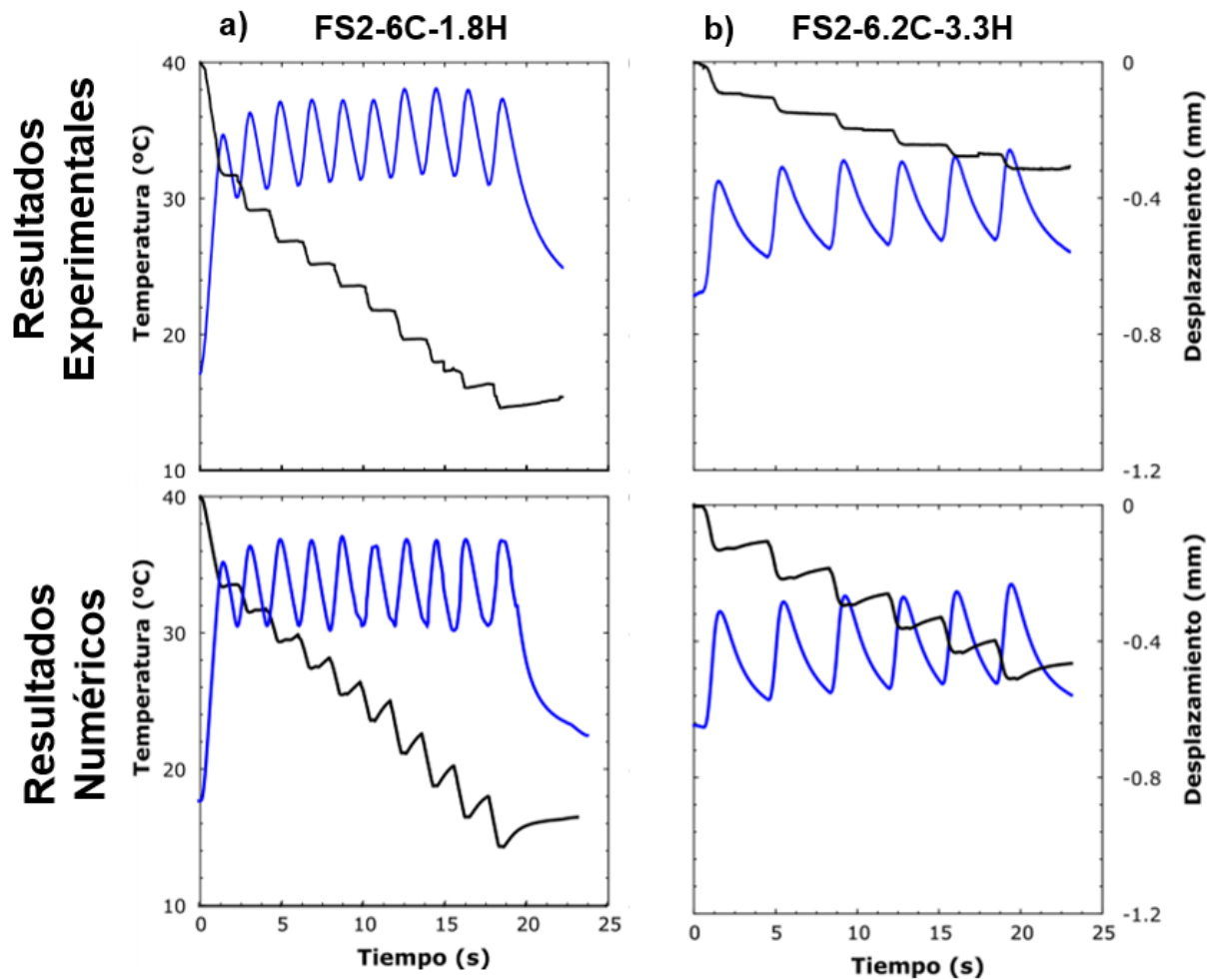


Figura 18. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia del periodo de los ciclos de temperatura. Curva de color negro corresponde al desplazamiento, en azul la temperatura al interior del acrílico. a) ensayo con menor periodo y mayor tasa de acumulación de desplazamientos. b) ensayo con mayor periodo, y menor tasa de acumulación de desplazamientos.

En la Figura 19 se muestran los resultados del análisis de la influencia del factor de seguridad al deslizamiento. Nuevamente, la hipótesis establecida en la sección anterior y verificada experimentalmente, se confirma con los resultados numéricos. Es decir, que los resultados del problema de elementos finitos con los experimentales son consistentes.

Si bien se evidencia una relación entre la tasa de acumulación de desplazamientos y el Factor de Seguridad, de lo observado en la Figura 20, se comprueba que esta no es lineal, sin embargo, para establecer algún tipo de comportamiento, se requiere de un volumen mayor de datos.

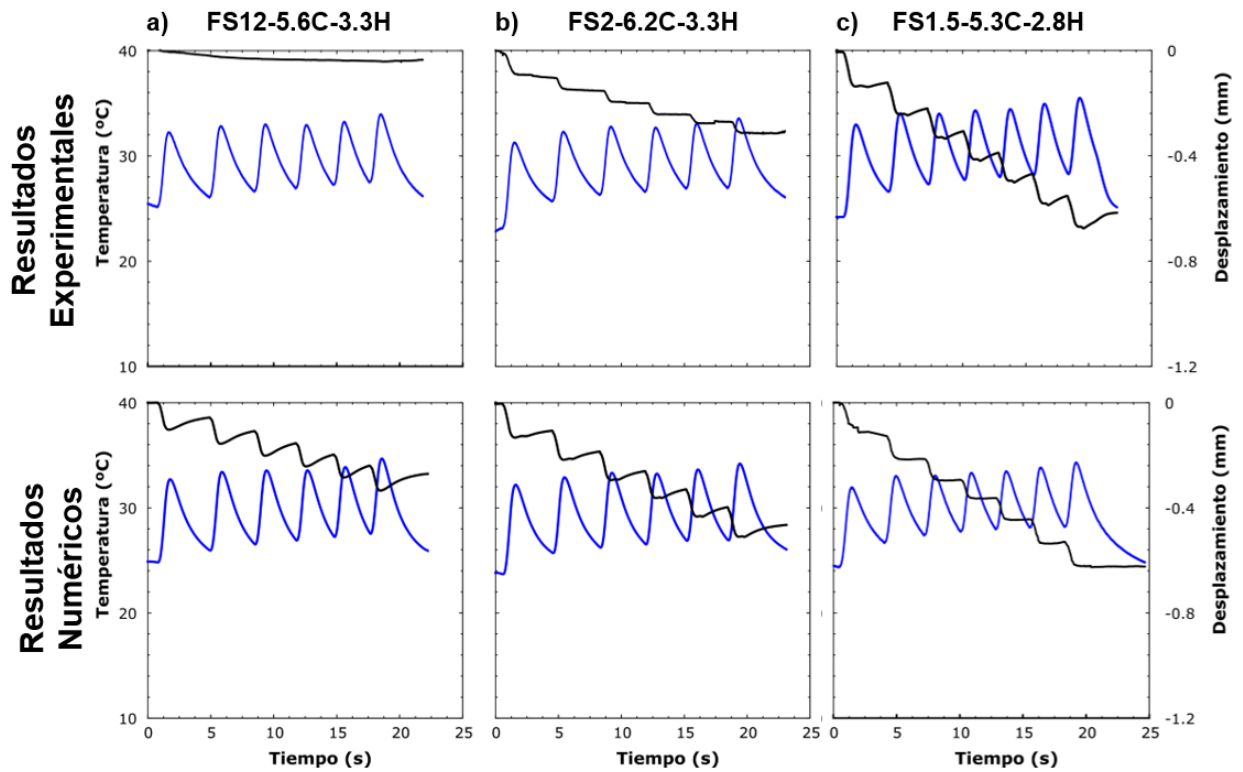


Figura 19. Comparación de resultados experimentales y numéricos. Influencia del Factor de Seguridad. Curva de color negro corresponde al desplazamiento, en azul la temperatura al interior del acrílico. a) es el ensayo con FS=12. b) es el ensayo con FS=2 y c) es el ensayo con FS=1.5 y más crítico.

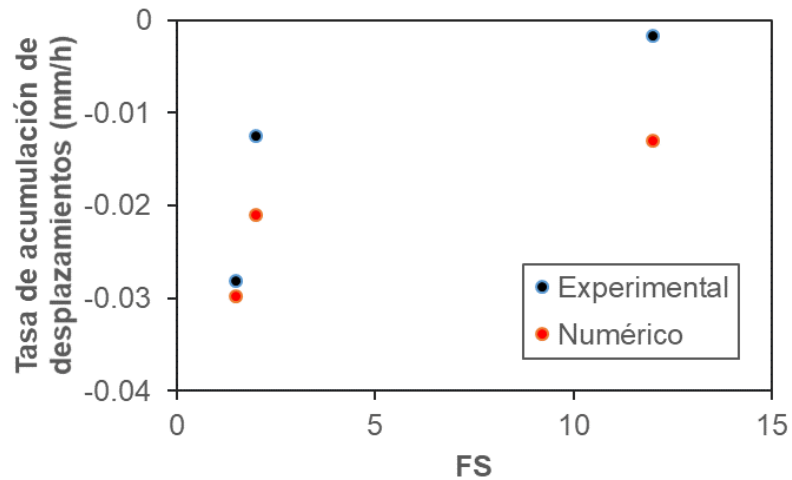


Figura 20. Tasa de acumulación de desplazamientos en función del factor de seguridad, resultados numéricos y experimentales.

3.4 Análisis Paramétrico

Con el objetivo de analizar la influencia de distintos parámetros que configuran el problema de manera aislada, se ejecutan series de modelos en donde se varía un parámetro a la vez. Los parámetros escogidos para este estudio son los que se muestran a continuación, siendo del 1 al 3 asociados a las condiciones de borde, desde el 4 hasta el 8 asociados a la caracterización termo-mecánica de los materiales o interfaz.

1. Periodo de los ciclos de temperatura
2. Amplitud de los ciclos de temperatura
3. Factor de seguridad al deslizamiento
4. Coeficiente de roce de la interfaz
5. Desplazamiento crítico elástico
6. Coeficiente de expansión térmica del material continuo
7. Conductividad térmica del suelo
8. Conductividad térmica del material continuo
9. Módulo de elasticidad del material continuo

Los valores utilizados para generar el set de pruebas para los casos 6 al 8, corresponden a magnitudes típicas de materiales de construcción que en la práctica son encontrados en contacto o embebidos en suelo. Los rangos de valores que se estudiarán se muestran en la Tabla 3, los valores del modelo base se muestran en la Tabla 2.

Tabla 3. Rangos de estudio en análisis paramétrico del modelo de elementos finitos y valores base

Parámetro	Unidad	Continuo	Suelo
Factor de Seguridad al deslizamiento FS	-	1,1 - 12	
Coeficiente de fricción en la Interfaz μ	-	0,27 - 0,4 y 0,5	
Desplazamiento crítico δ^*	m	5×10^{-6} - 1×10^{-4}	
Módulo de elasticidad E	Pa	$0,8 \times 10^9$ - 200×10^9	$6,0 \times 10^7$
Coeficiente de expansión térmica α	1/°C	0 - $1,2 \times 10^{-3}$	0
Conductividad térmica κ	W/m ² K	0,19 - 401	0,4 - 2,4

Para todos los ensayos se utiliza una condición de borde sinusoidal de periodo 1 hora y amplitud 15°C.

Resultados:

La influencia del desplazamiento crítico elástico en la interfaz suelo-acrílico, se muestra en la Figura 21, donde se observa que la tasa de acumulación de desplazamientos es sensible a este parámetro. Es por ello, que un análisis de sensibilidad para este parámetro debe ser el primer ejercicio que debe realizarse a la hora de caracterizar la resistencia al corte de un contacto de dos superficies. Ante aumentos de la magnitud del

desplazamiento máximo elástico, la tasa de acumulación de desplazamiento aumenta, hasta obtener un comportamiento que pierde la forma escalonada que se ha observado en los ensayos experimentales. Para valores inferiores a $1 \times 10^{-5} \text{m}$, se observa que la tasa de acumulación disminuye, sin embargo, para el caso estudiado, la diferencia es muy leve, por lo que se podría adoptar este valor si no se cuenta con mayor información del comportamiento mecánico de la interfaz.

En la Figura 22 se muestra los resultados de tres modelos de elementos finitos donde se varía únicamente el coeficiente de roce de la interfaz, manteniendo constante el factor de seguridad al deslizamiento. Estos resultados demuestran que, mientras el factor de seguridad se mantenga, el coeficiente de roce tiene nula incidencia en el desarrollo de desplazamientos de la interfaz suelo-polímero y su acumulación. Por otro lado, si las cargas de sollicitación se mantienen y el coeficiente de roce cambiara, el sistema sería tan sensible como lo es a la variación del Factor de Seguridad, pues en definitiva sería este el parámetro que cambiaría.

La influencia del periodo y de la amplitud de los ciclos de temperatura se analiza de manera separada con modelos bajo ciclos sintéticos de temperatura sinusoidales de amplitud y periodo variables. Los resultados se muestran en la Figura 23, donde se observan tres pruebas de distintas amplitudes y periodos, de éstos se desprende que, a mayor amplitud de ciclos, la tasa de acumulación de desplazamientos relativos es mayor. También se observa que, al aumento del periodo, disminuye la tasa de acumulación de deformaciones en el tiempo. Si bien los resultados muestran desplazamientos que describen sinusoides (retrocesos y deslizamientos), esto en la práctica sería difícil de ver, ya que los ciclos de temperatura no son perfectamente simétricos, además, como se ha observado en los resultados experimentales, la fase de enfriamiento predomina el nulo desplazamiento por sobre el retroceso.

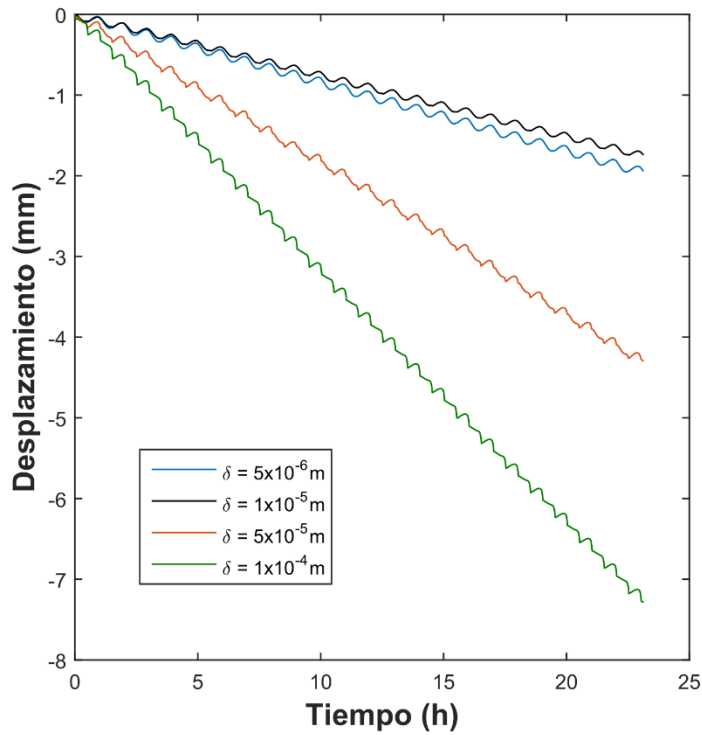


Figura 21. Efecto del desplazamiento crítico elástico definido en el contacto tangencial entre las superficies acrílico-suelo. Ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C.

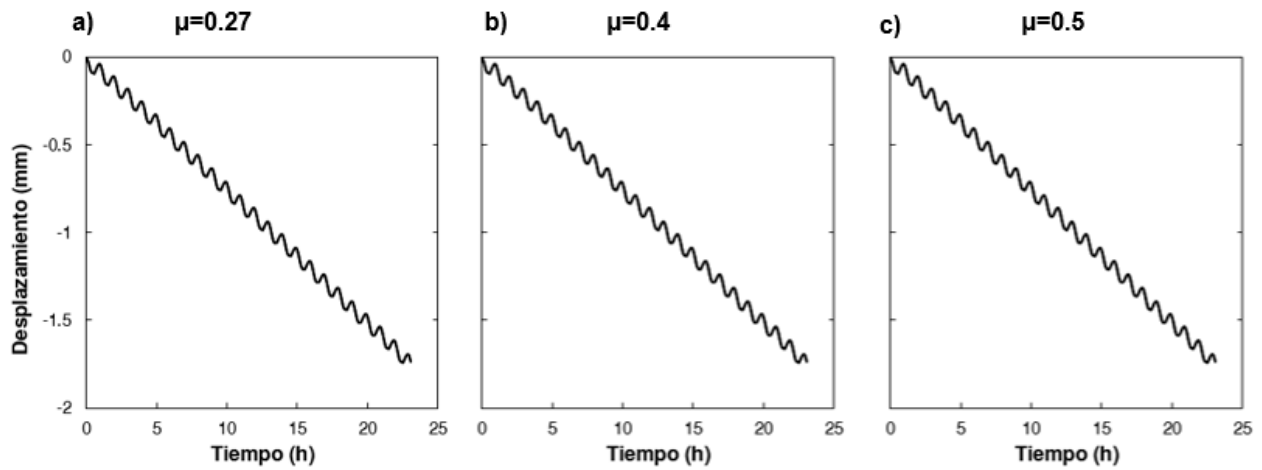


Figura 22. Influencia del coeficiente de roce en la acumulación de desplazamientos, aplicación de condición de borde de temperatura de ciclos sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C. Para tres coeficientes de roce diferentes, donde se mantiene constante el factor de seguridad al deslizamiento FS=2.

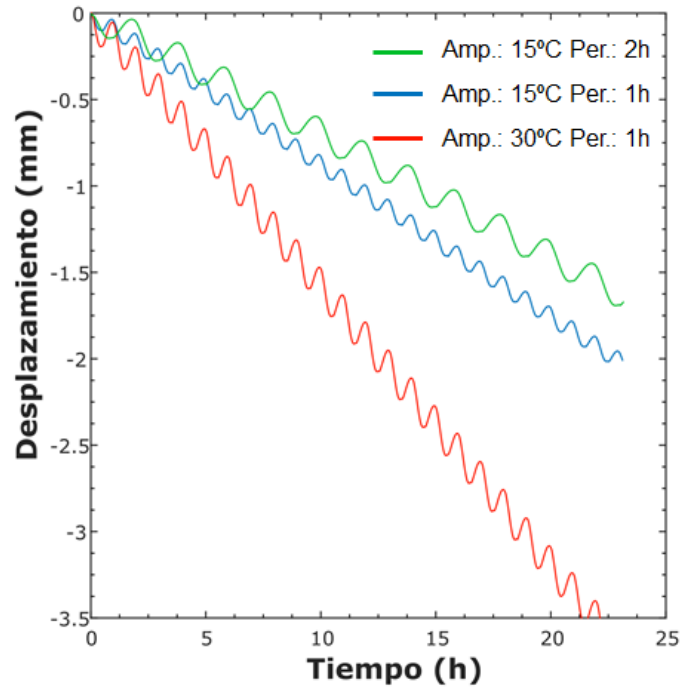


Figura 23. Influencia del periodo y de la amplitud de los ciclos de temperatura en el fenómeno de acumulación de desplazamientos en la interfaz suelo-polímero. Análisis realizado con modelos con ciclos de temperatura artificiales correspondientes a sinusoides de amplitud y periodo variables.

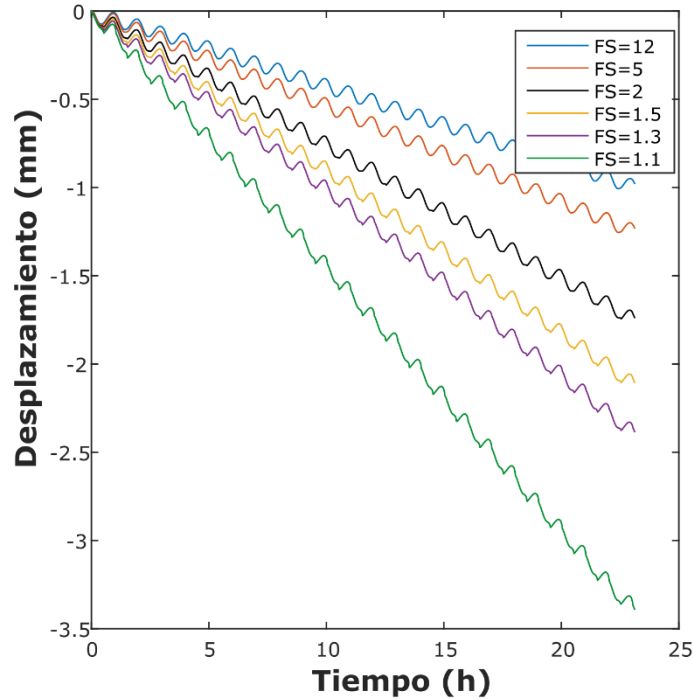


Figura 24. Efecto del Factor de Seguridad al deslizamiento en la acumulación de desplazamientos con los ciclos de temperatura. Análisis realizado con ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C

En la Figura 24 se muestran los resultados del efecto del Factor de Seguridad, de donde se puede observar que la tasa de acumulación de desplazamientos con los ciclos de temperatura aumenta a medida que se alcanza el valor crítico ($FS=1$). Para valores mayores a 2, el sistema es poco sensible a los cambios del estado de cargas, no así para los inferiores.

En la Figura 25 se exhibe los resultados del análisis de la influencia del coeficiente de expansión térmica del bloque superior. De estos resultados se desprende que la tasa de acumulación de deformaciones es proporcional al incremento a este parámetro. Además, es posible verificar que cuando el coeficiente de expansión es nulo, no se producen desplazamientos.

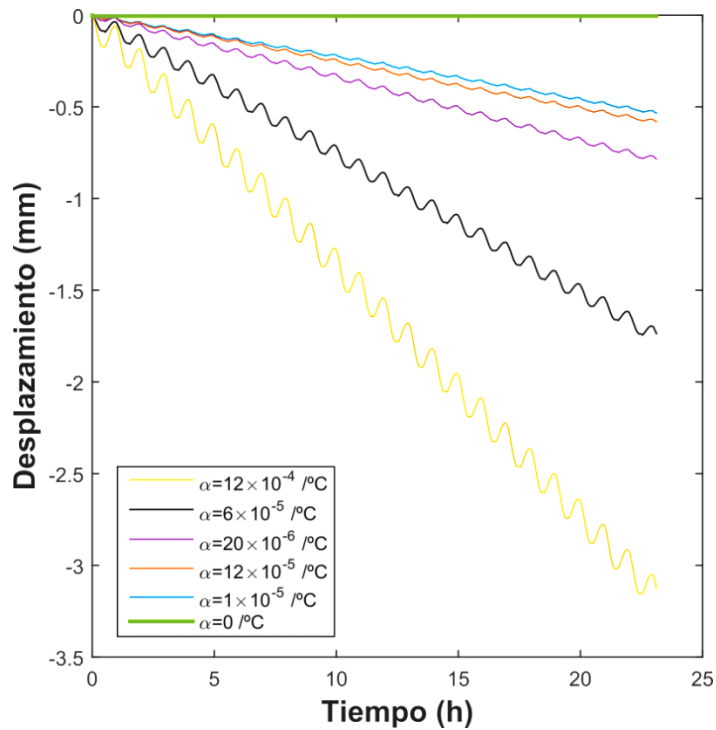


Figura 25. Influencia del coeficiente de expansión térmica del bloque superior. Pruebas realizadas con ciclos de temperatura sintéticos sinusoidales de periodo 1 h y amplitud 15°C y set de parámetros correspondientes al caso base.

Los resultados del análisis de la influencia de la conductividad térmica del suelo se muestran en la Figura 26, donde es posible ver que, bajo las condiciones de borde definidas en el modelo, la conductividad térmica, es directamente proporcional a la tasa de acumulación de desplazamientos. Sin embargo, la sensibilidad a la variación de este parámetro es baja, y su influencia se explica porque, a mayor conductividad del suelo, más rápido se calienta y por ende, o el flujo de calor hacia el bloque superior aumenta, o el flujo de calor que sale del bloque es menor.

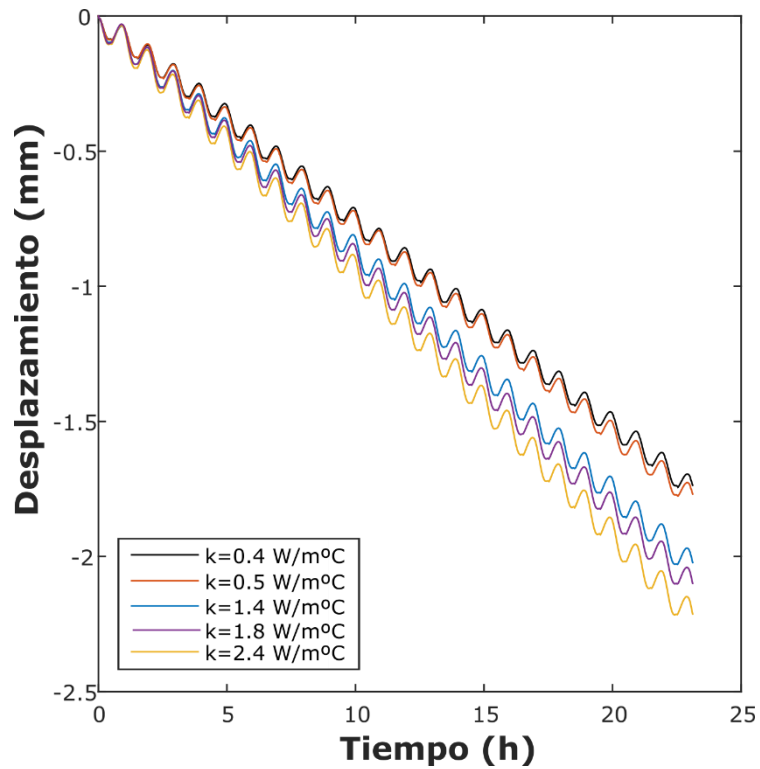


Figura 26. Efecto de la variación de la conductividad térmica del suelo. Análisis realizado sobre ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C y con set de parámetros correspondientes al caso base.

La influencia de la conductividad térmica del bloque superior se muestra en la Figura 27. Donde se puede observar que a la tasa de acumulación de desplazamientos es proporcional a este parámetro. Este efecto se explica en que al mayor aumento de temperatura del bloque completo, se tiene una mayor expansión del bloque, logrando así mayores desplazamientos relativos. Por otro lado, también se observa que, una vez alcanzado cierto umbral, la sensibilidad a la variación de este parámetro es inferior, e incluso la tasa de acumulación de desplazamientos se reduce. Para el caso de una conductividad térmica de $401\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (magnitud asociada a materiales como el cobre), el bloque se termina calentando completamente y de manera prácticamente homogénea, y no se alcanza a enfriar del todo, por lo que la tasa de acumulación de desplazamientos es inferior.

En la Figura 28, se muestran los resultados del efecto del módulo de elasticidad del bloque superior en el desarrollo de desplazamientos por cambios de temperatura. Se puede evidenciar que su incidencia es mínima, a pesar de que varía en órdenes de magnitud. En el detalle se observa que, a mayor rigidez, la tasa de acumulación es inferior. Sin embargo, se concluye que la influencia de este parámetro es despreciable.

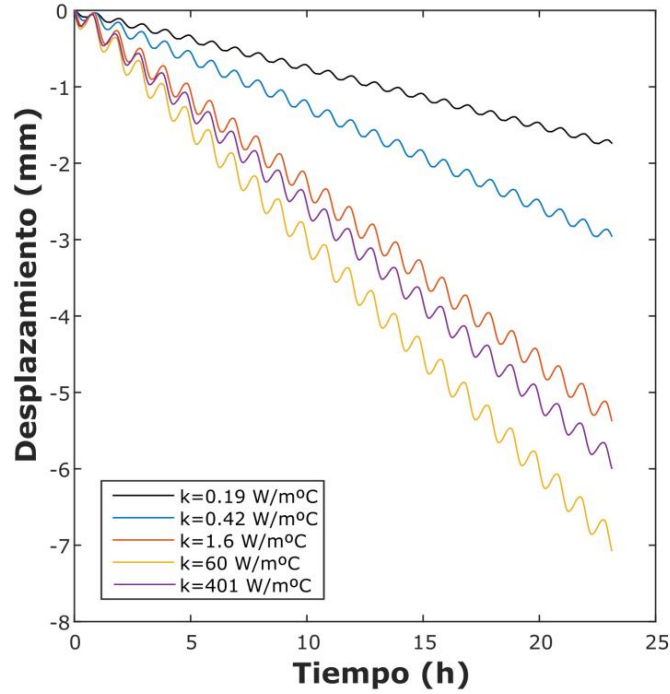


Figura 27. Influencia de la conductividad térmica del acrílico. Pruebas realizadas con ciclos de temperatura sintéticos, sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C y set de parámetros correspondiente al caso base

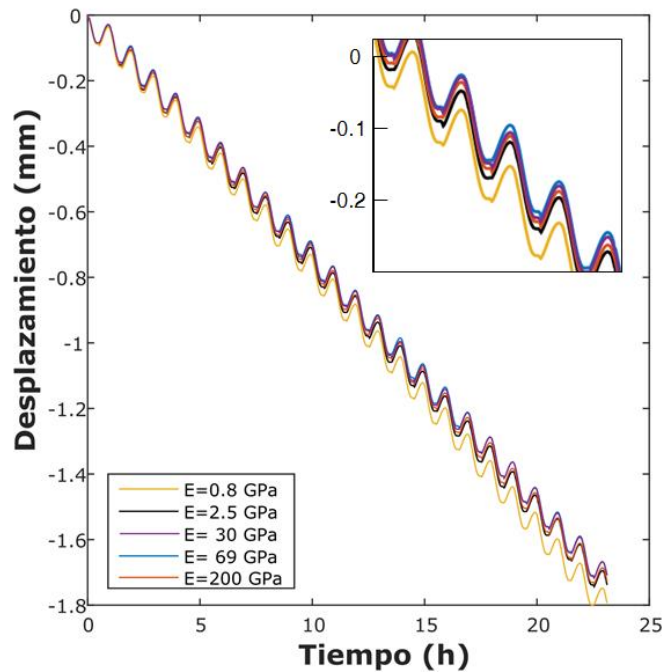


Figura 28. Análisis de la influencia del módulo de elasticidad del bloque. Pruebas realizadas con ciclos de temperatura sintéticos, sinusoidales de periodo 1 hora y amplitud 15°C y set de parámetros correspondiente al caso base.

4 Modelo Analítico

4.1 Antecedentes

Con el objeto de cuantificar los desplazamientos acumulados que se producen en un pilote producto de los ciclos de temperatura propios de sus condiciones de operación, Knellwolf et al. (2011) y Pastén y Santamarina (2014b) desarrollaron modelos analíticos que buscan estimar dichos desplazamientos a lo largo del pilote. Ambos estudios aplicaron el método de transferencia de carga (Coyle y Reese, 1966; Poulos y Davis, 1980) que discretiza el pilote en varios segmentos. Cada segmento se analiza por separado, con dos fuerzas axiales (una en la parte superior y otra en la inferior), más el esfuerzo de corte en la superficie en contacto con el suelo (Figura 29a). Las condiciones de borde del problema corresponden a la aplicación de la carga P en la cabeza del pilote más los ciclos de temperatura que son aplicados.

Los principales factores considerados para el análisis del pilote son:

- El pilote es dividido en N segmentos
- Para cada uno de estos segmentos $i=1..N$ se realiza un equilibrio de fuerzas con el objetivo de determinar la fuerza axial Q_i [kN], el desplazamiento relativo δ_i [mm] y esfuerzo de fuste s_i [kPa] en profundidad.
- La fricción entre el pilote y el suelo está dado por $\tau = \sigma_n \mu$, donde $\mu = \tan(\phi)$ [-] es el coeficiente de fricción asociado a ϕ [°] es el ángulo de fricción interna entre el suelo y el material del pilote, σ_n [kPa] es el esfuerzo normal en la interfaz, que para este caso es $\sigma_n = K_0 \cdot \gamma \cdot z$, donde K_0 es el coeficiente de empuje geostático, γ [kN/m³] el peso unitario del suelo y z [m] la longitud del pilote enterrado.

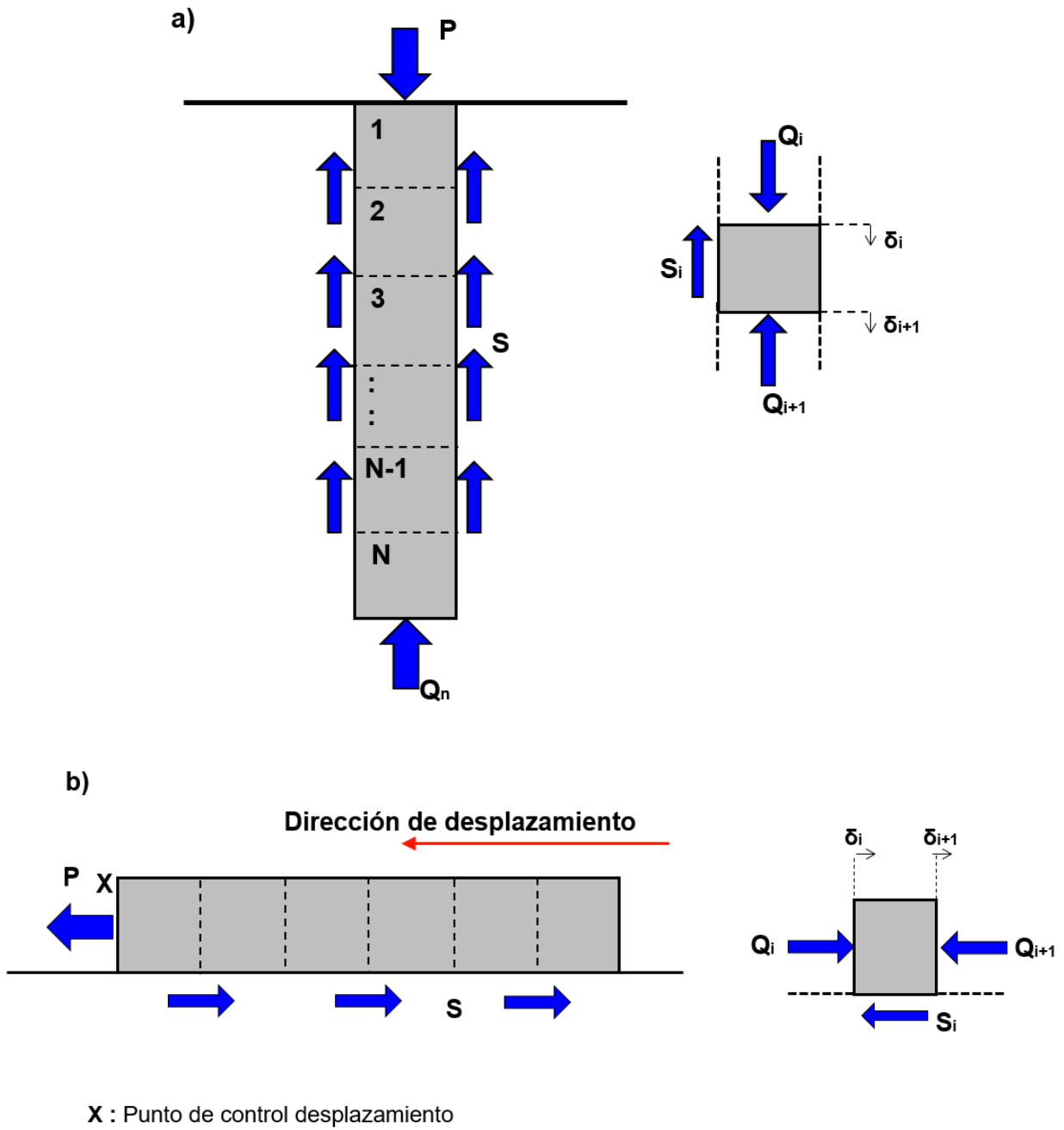


Figura 29. Esquema del método de transferencia de carga: a) problema del pilote termo-activo b) modificación problema interfaz acrílico- suelo

Para el caso en estudio, en un prisma de largo L [m] y ancho D_1 [m] y alto D_2 [m], la fuerza estática axial en uno de sus extremos será $P_{axial} = Q_1$ (condición de borde del problema). En cada segmento, se debe cumplir que la fuerza axial en la zona inferior debe ser igual a la fuerza arriba del segmento más la fuerza asociada a la fricción o resistencia de fuste en el segmento. La resistencia de fuste S_i [kN] para cada segmento está dada por (Figura 28a):

$$S_i = s_i D_1 L_0 \quad (7)$$

Donde s_i [kPa] corresponde al esfuerzo de corte en la interfaz, cuyo comportamiento es asumido elástico-perfectamente plástico, caracterizado por la rigidez en la zona elástica $k_i = s_i^{ult} / \delta_s^*$, el desplazamiento crítico δ_s^* [m], y por el esfuerzo de corte último $s_i^{ult} = \sigma'_{vi} \mu$ [kPa] como se muestra en la Ecuación (7), siendo $\sigma'_{vi} = D_2 \cdot \gamma_{acrilico}$ [kPa] constante para cada segmento i , y μ el coeficiente de fricción en la interfaz suelo-pilote (Pastén y Santamarina, 2014b).

$$s_i = s_i(\delta_i, \delta_{i+1}) = \begin{cases} -s_i^{ult} & \text{si } \left(\frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{2}\right) \leq -\delta_s^* \\ k_i \left(\frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{2}\right) & \text{si } -\delta_s^* < \left(\frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{2}\right) \leq \delta_s^* \\ s_i^{ult} & \text{si } \delta_s^* \leq \left(\frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

Para un aumento de temperatura, la expansión de cada segmento de pilote se encuentra restringida por las fuerzas axiales y el fuste. Además, se requiere cumplir con la compatibilidad de desplazamientos, es decir que la elongación (o contracción) del segmento sea igual a la elongación producida por la temperatura $\Delta_i^T = \alpha l_i \Delta T$ menos la producida por la variación de la fuerza axial $\Delta_i^\sigma = \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \frac{L_i}{AE}$, con A [m] el área transversal y E [kPa] el módulo de elasticidad.

El algoritmo numérico (Figura 30) que propone el estudio de Pastén y Santamarina (2014) permite calcular la fuerza axial Q , el fuste s y los desplazamientos δ . Para ello, comienza con la resolución del problema en su condición estática, donde itera el valor del desplazamiento en la punta del pilote δ_{N+1} hasta que la diferencia entre el valor de la fuerza axial superior en el primer segmento y la carga en la cabeza del pilote sea inferior a una tolerancia $|Q_1 - P_{axial}| \leq \varepsilon$.

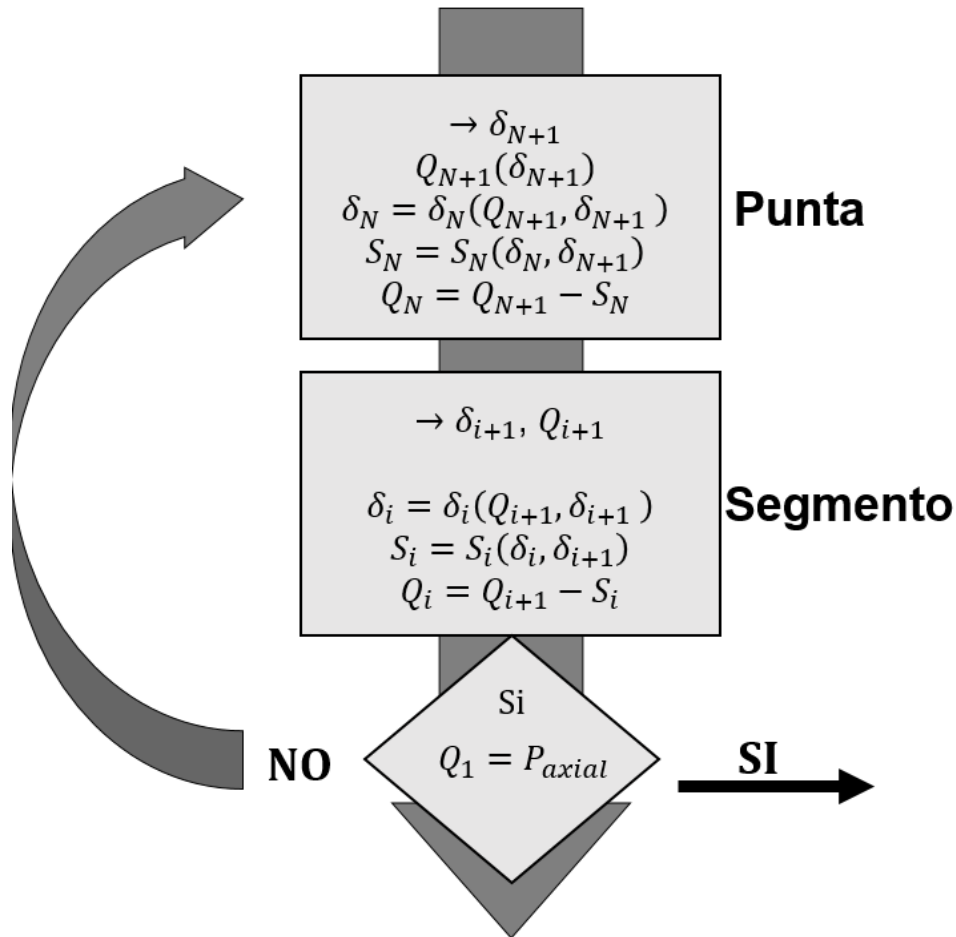


Figura 30. Esquema resumen del algoritmo de resolución del modelo analítico del pilote, utilizado para reproducir el montaje experimental.

Una vez obtenida la solución en condición estática, el algoritmo resuelve el problema considerando una variación de temperatura que induce una variación en el largo del pilote, lo que conlleva a repetir las iteraciones, y donde el efecto de los ciclos se puede determinar resolviendo el problema tantas veces como cambios de temperatura haya en el sistema.

4.2 Metodología

Utilizando como base del modelo analítico propuesto por Pastén y Santamarina (2014), se reproducen las condiciones de laboratorio, que tiene las siguientes diferencias con el modelo original:

- El modelo de laboratorio se encuentra horizontal, por lo que no hay resistencia de punta, sólo resistencia al deslizamiento por fricción. Por otro lado, el esfuerzo de corte está dado por $s = \sigma'_v \mu$, donde $\sigma'_v = W/A$ es constante a lo largo de todo el contacto, y es proporcional al peso del acrílico W e inversamente al área de la superficie de contacto A .
- El contacto con el suelo es solamente por una de las caras del acrílico.
- La carga se aplica en tracción, por lo que sería análogo a tener un pilote cuya fuerza en la cabeza sea en tracción, de tal manera que ambos no desarrollen una resistencia de punta.

A pesar de las diferencias, ambos sistemas pueden de experimentar acumulación de desplazamientos, debido a que las condiciones necesarias y suficientes, que son estados de carga críticos al deslizamiento relativo en la interfaz más ciclos de temperatura, se encuentran presentes.

Por otro lado, entendiendo los alcances que tiene el desarrollo analítico, se busca verificar que el módulo sea capaz de reproducir el fenómeno de manera similar a lo que se ha observado experimentalmente y en el modelo de elementos finitos. Para ello, se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros que afectan el desarrollo de desplazamientos irreversibles producto de ciclos de temperatura. Con este objeto, se establece una combinación de parámetros base y un rango donde se varía cada uno de ellos, dejando el resto constantes. Estos valores corresponden a magnitudes típicas de materiales de construcción como acero, hormigón y HDPE. Los valores y tramos de análisis seleccionados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores utilizados para el caso base, y rangos para análisis paramétrico

Parámetro	Unidad	Valor Base	Rango de Valores
Módulo de Elasticidad Pila, E	GPa	2,5	0,05 – 5 ⁽¹⁾
Densidad Acrílico, γ_h	kg/m ³	1180	-
Densidad Suelo, γ_s	kg/m ³	1475	-
Coef. Expansión Lineal Pila, α	1/°C	6x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁸ – 7x10 ⁻⁵ (2)
Coef. Fricción interfaz, μ	-	0,27	0,1 – 0,27
Factor de Seguridad, FS	-	2	1,01 - 5
Amplitud Ciclos de Temperatura	°C	15	10 - 19
Desplazamiento crítico elástico δ	m	5x10 ⁻⁵	1x10 ⁻⁵ - 6x10 ⁻⁵
Número de Segmentos N	-	50	15 - 100

(1) Cota inferior corresponde a HDPE, cota superior Acero

(2) Cota superior HDPE

4.3 Resultados

Para verificar que los resultados obtenidos sean válidos y que no dependen de la discretización seleccionada, en primer lugar, con los valores base, el modelo se ejecuta con distinto número de segmentos. En la Figura 31 se observa cómo varían los resultados dependiendo de qué tan pequeñas son las divisiones del bloque de acrílico. Para un número inferior a 15 segmentos, el problema es inestable y no arroja resultados coherentes, por ende, pierde validez. Para este estudio se escoge el valor $N=50$, entendiendo que a mayor número de segmentos, mayor precisión, sujeto al tiempo que toma el modelo en correr para un número mayor de segmentos.

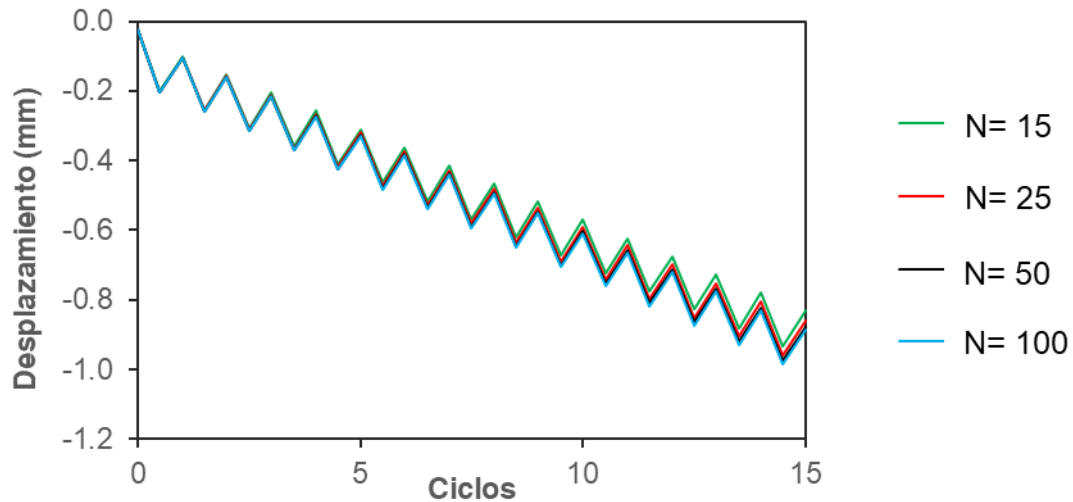


Figura 31. Efecto del número de segmentos en los resultados

En segundo lugar, se analiza la sensibilidad al desplazamiento crítico elástico. Esto debido a la influencia que tiene sobre el comportamiento global de los desplazamientos relativos del acrílico con el suelo, y a la escasa información que se dispone del comportamiento elástico en la interfaz. El valor asignado finalmente, al igual que en el modelo de elementos finitos, corresponde a aquel que permite reproducir el fenómeno esperado. Con este objetivo, se comparan los resultados obtenidos (Figura 32) con los resultados del experimentales y numéricos del test más semejante, que corresponde al de $FS=2$, $6^\circ C$ de amplitud y 1.8 horas de periodo. En la Figura 33 se observa que, para un desplazamiento crítico de $5 \times 10^{-5} m$ los resultados son similares en términos de orden de magnitud, por lo que para los análisis de sensibilidad de los parámetros posteriores se adopta este valor.

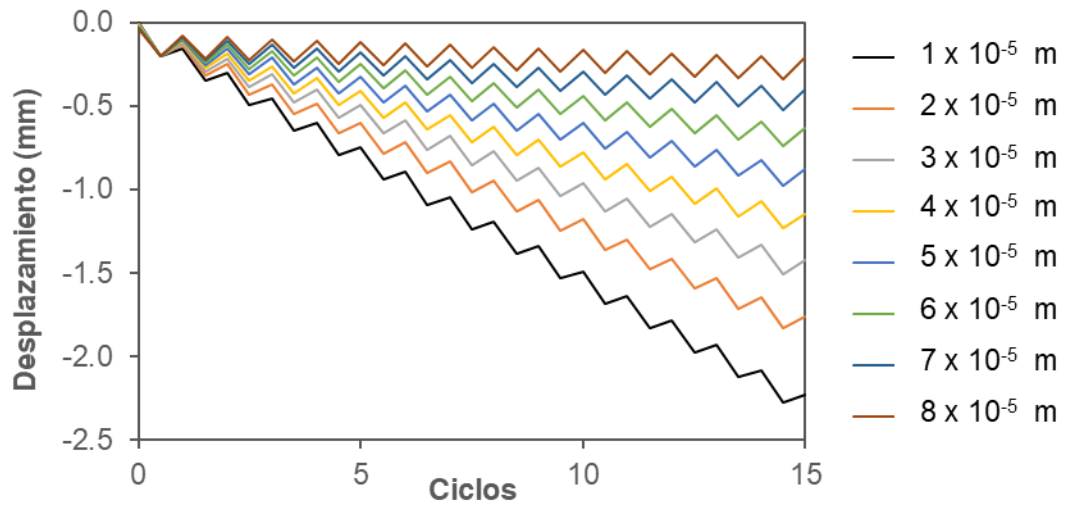


Figura 32. Influencia del desplazamiento crítico elástico

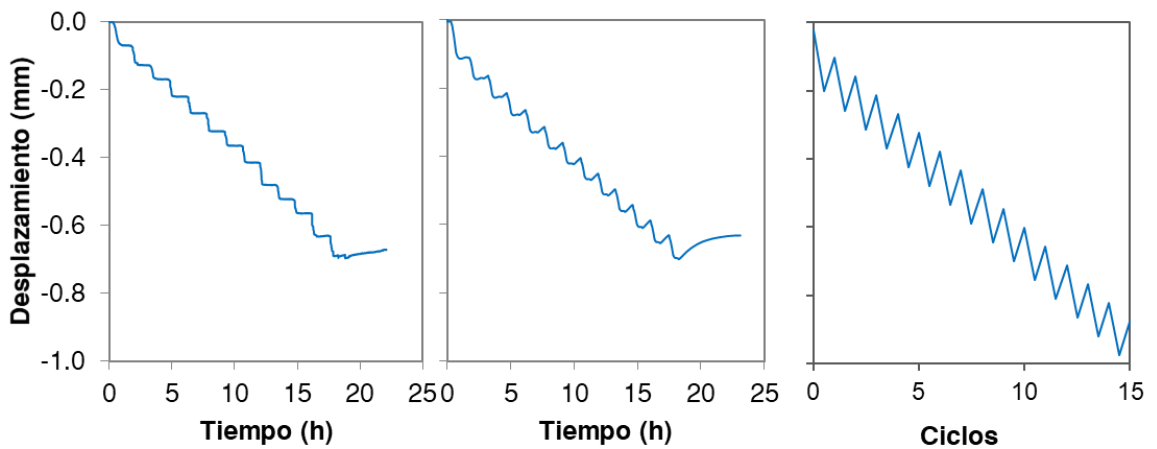


Figura 33. Comparación de resultados a) experimentales, b) numéricos y c) del modelo analítico con propiedades representativas, test FS2-6C-1.8H

El modelo es muy sensible a pequeñas variaciones de este parámetro. En la Figura 34 se muestra tasa de acumulación de desplazamientos para cada caso, donde se puede observar una proporcionalidad con el cuadrado del desplazamiento crítico.

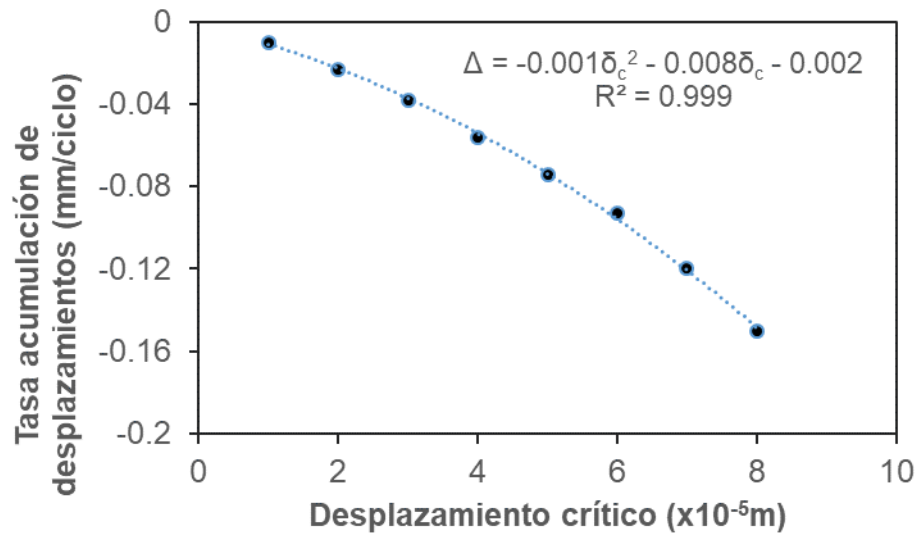


Figura 34. Tasa de acumulación de desplazamientos en función del desplazamiento crítico elástico.

La nula influencia del coeficiente de roce en el fenómeno de acumulación de desplazamientos, para un mismo factor de seguridad, se verifica en este modelo en la Figura 35. Estos resultados son consistentes con lo observado tanto en laboratorio como en los modelos de elementos finitos, confirmando que independiente de la rugosidad de la interfaz, domina el factor de seguridad al deslizamiento relativo entre ambas superficies.

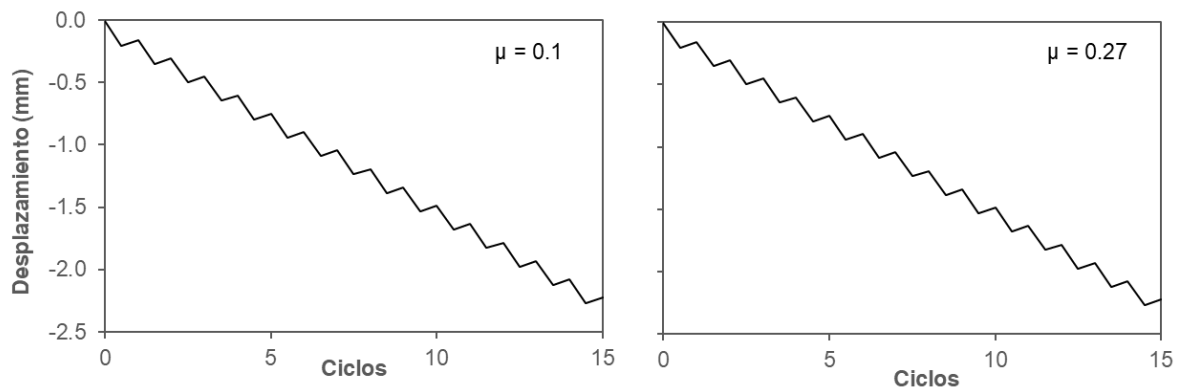


Figura 35. Resultados del modelo analítico con diferentes coeficientes de fricción suelo-material, donde se verifica la nula influencia si el FS es constante (FS=2).

El efecto de la variación del coeficiente de expansión térmica del acrílico se muestra en la Figura 36. De la figura se puede establecer que la tasa de acumulación de desplazamientos guarda una proporcionalidad lineal con el coeficiente de expansión lineal. Sin embargo, esta relación es válida a partir de cierto valor de coeficiente de expansión, ya que en la Figura 37 se observa que para los casos analizados con coeficiente menor a $3 \times 10^{-5} (1/^{\circ}\text{C})$ la tasa de acumulación es nula, mientras que para los mayores a $3 \times 10^{-5} (1/^{\circ}\text{C})$, existe un buen ajuste lineal entre los parámetros.

En la Figura 38 se muestra la influencia de la amplitud de los ciclos de temperatura en la tasa de acumulación de desplazamientos. Los resultados con amplitudes sobre 15°C no entregan resultados coherentes, por lo que se presume que el modelo ante desplazamientos tan grandes se vuelve inestable. Los resultados para amplitudes menores, muestran proporcionalidad directa entre la tasa de acumulación de desplazamientos y la amplitud, lo que es posible verificar graficando la tasa versus la amplitud de los ciclos, como se muestra en la Figura 39, donde se observa que la relación es directa en un muy buen ajuste lineal ($R^2=0.99$).

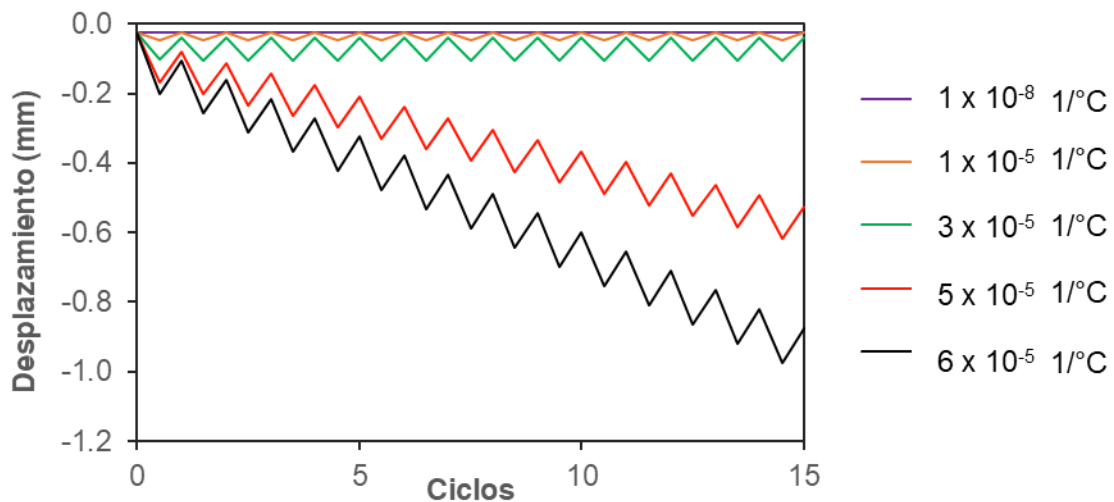


Figura 36. Análisis de sensibilidad al coeficiente de expansión lineal del acrílico

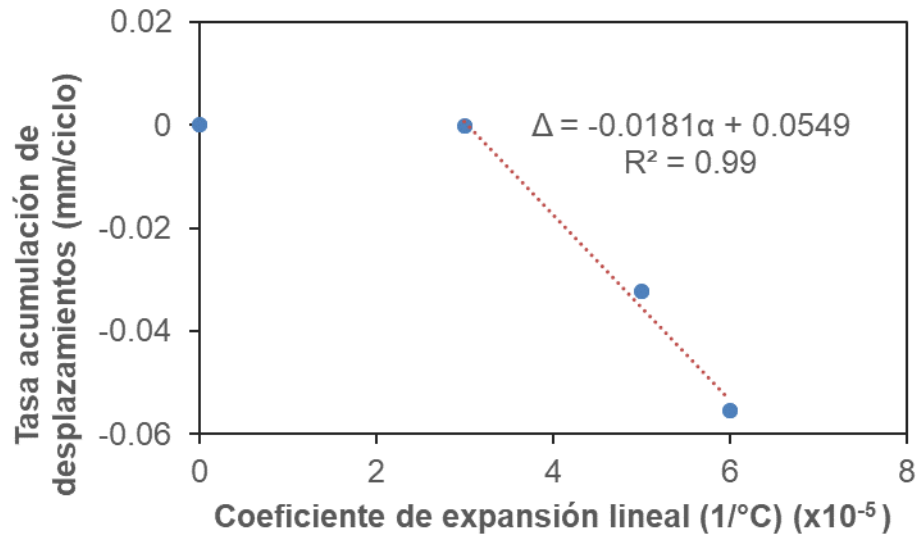


Figura 37. Tasa de acumulación de desplazamientos versus coeficiente de expansión lineal del bloque

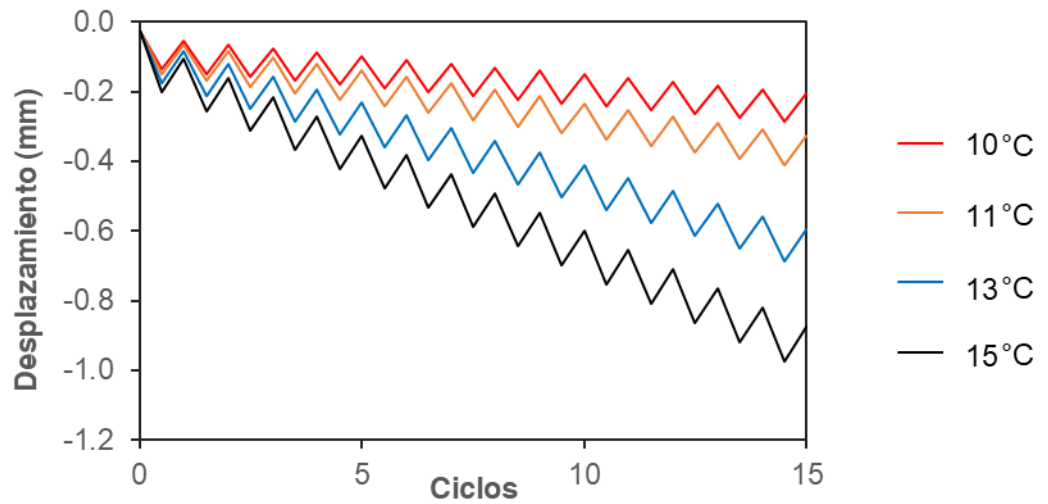


Figura 38. Influencia de la amplitud de ciclos de temperatura

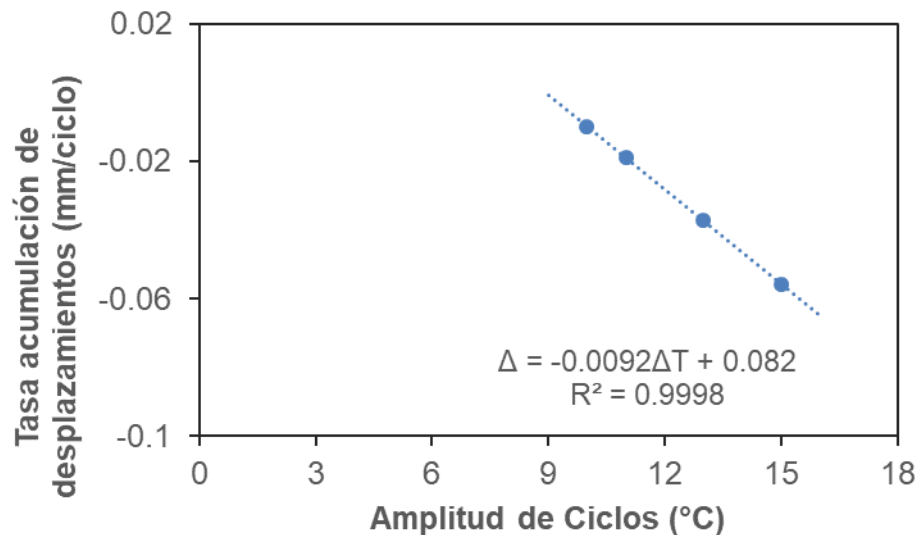


Figura 39. Tasa de acumulación de desplazamientos versus amplitud de los ciclos.

Para el caso del módulo de elasticidad del bloque, el modelo es prácticamente insensible a su variación, incluso ante grandes cambios, lo que se muestra en la Figura 40 donde no es posible apreciar mayores diferencias.

Para el caso del factor de seguridad (Figura 41), se observa que, para el rango de valores elegido, se verifica que la tasa de acumulación de desplazamientos es inversamente proporcional al Factor de Seguridad. Sin embargo, para valores muy bajos, esta proporcionalidad no es directa. Esto ya ha sido verificado experimentalmente y numéricamente a través del modelo de elementos finitos, por lo que se puede establecer consistencia entre lo que indican las tres metodologías. También se observa que la recuperación de desplazamientos en la fase de enfriamiento es menor (FS muy bajos), donde los desplazamientos describen una recta prácticamente, desapareciendo los escalones que se observan con FS más altos.

En la Figura 42 se observa la tasa de acumulación de desplazamientos de la fase cíclica (sin contar los primeros ciclos de cada caso cuyo comportamiento escapa de lo lineal), en relación al Factor de Seguridad. Los resultados muestran que existe una directa proporcionalidad para FS menores a 2, mientras que para valores sobre 2, la tendencia se pierde. Sin embargo, el ajuste para este caso de estudio no se adecúa tanto como otros, ya que el coeficiente de correlación es ligeramente menor ($R^2=0.91$).

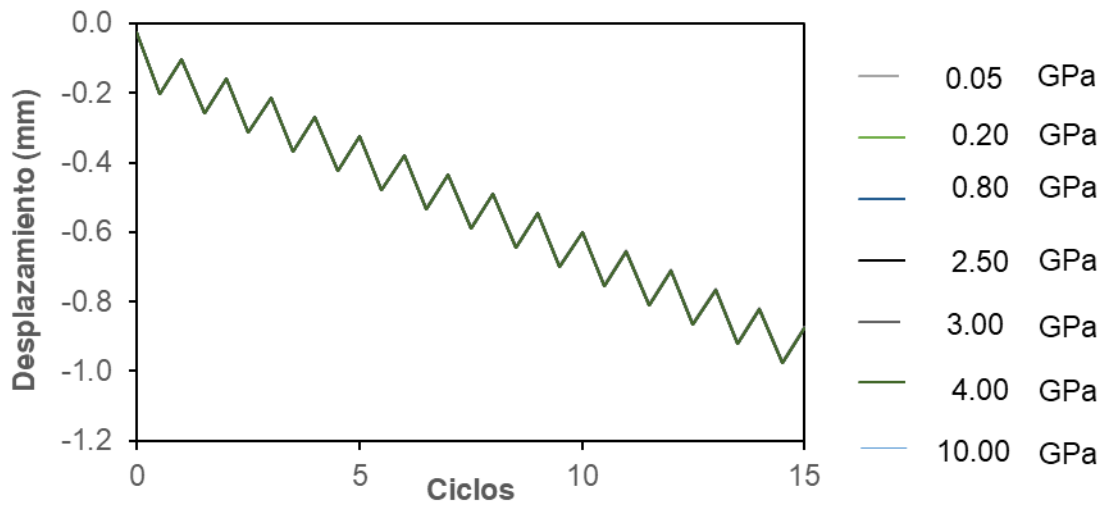


Figura 40. Análisis de sensibilidad del modelo analítico a la variación del módulo de elasticidad del acrílico

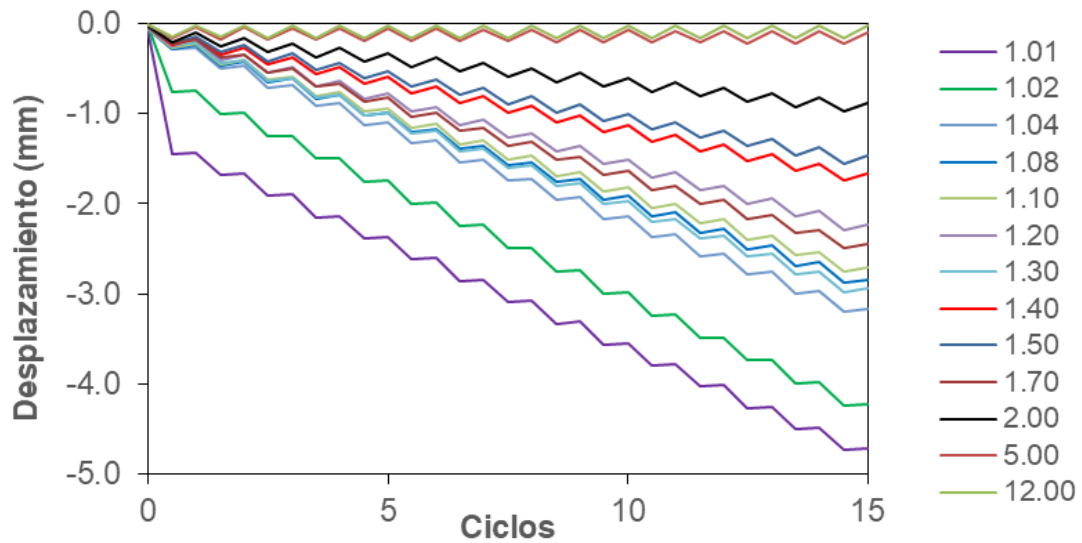


Figura 41. Análisis de sensibilidad del modelo analítico a la variación del factor de seguridad al deslizamiento de la interfaz suelo-acrílico

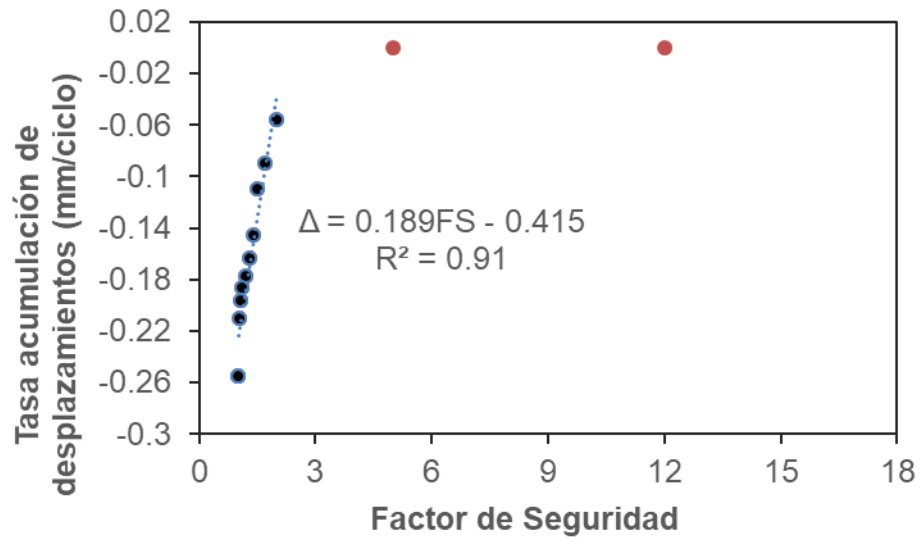


Figura 42. Tasa de acumulación de desplazamiento en función del factor de seguridad

5 Aplicación Práctica

5.1 Antecedentes Generales

El uso de combustibles fósiles como una de las principales fuentes de energía, ha generado un exceso en la emisión de gases de efecto invernadero, desencadenando consecuencias perjudiciales para el medioambiente. Esta situación se ha establecido como insostenible y sus efectos ya son observables con el calentamiento global (Seisdedos, 2012).

Por lo anterior, en los últimos años ha surgido en Chile y el mundo la inquietud por ampliar la matriz energética, hecho que ha llevado a buscar diversas fuentes que permitan generar energía de forma más limpia y económica que las existentes. En este contexto, se encuentra el uso de la energía geotérmica, que aprovecha las características térmicas de la tierra, que son producto de la generación de calor en el centro de la tierra, el fenómeno de decaimiento radiactivo, y la radiación recibida desde el sol. Esta combinación da como resultado un perfil de temperaturas que hasta los primeros 15m varía estacionalmente y con las fluctuaciones diarias, y que luego hasta los 100m aproximadamente se mantiene relativamente constante, para luego aumentar linealmente en profundidad, esquema que se muestra en la Figura 43 (Deutsche Energie-Agentur (DENA), 2017).

Dependiendo del nivel de profundidad, la forma de aprovechamiento de la energía es diferente. Para grandes profundidades, las altas temperaturas permitirían la generación de electricidad mediante los sistemas mejorados geotérmicos o *Enhanced Geothermal Systems (EGS)*. Por otro lado, de manera superficial, la inercia térmica existente desde los 15m de profundidad permite su aprovechamiento en la climatización de edificios y viviendas, mediante un sistema de tuberías unido a una bomba de calor (Johnston et al., 2011). A pesar de los beneficios del uso de estos sistemas, su instalación conlleva altos costos iniciales, asociados principalmente a la perforación, lo que podría persuadir la idea de su uso (Brandl, 2006). Sin embargo, estos costos podrían evitarse si se aprovechan los pilotes para la disposición de la red de tuberías del sistema primario que interactúa con el suelo y que luego mediante una bomba de calor al sistema secundario, encargado de intercambiar calor en el edificio y cumplir la función de climatización, el esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 44.

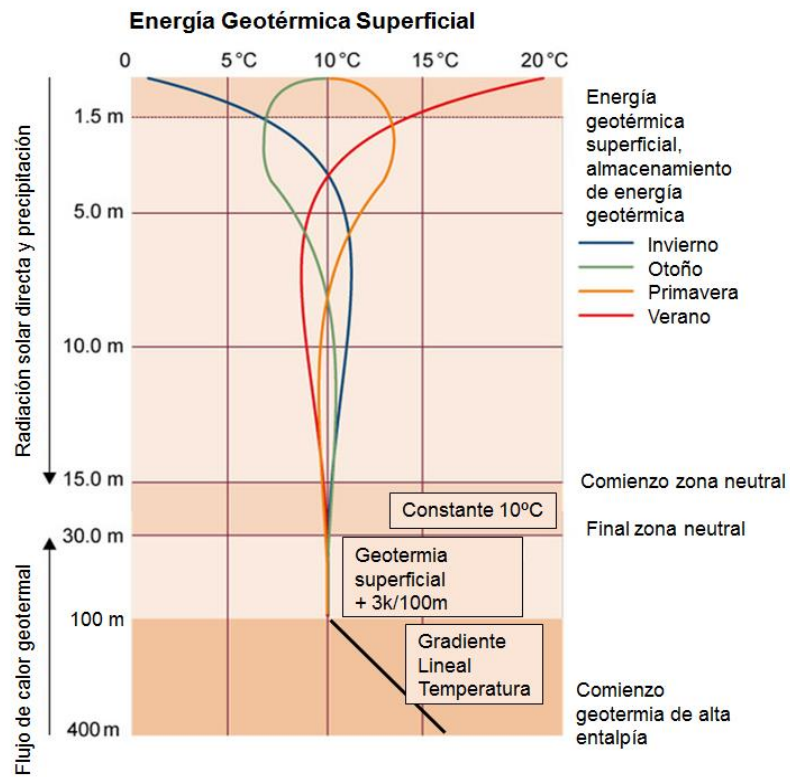


Figura 43. Perfil de temperatura en profundidad y variaciones superficiales estacionales (Modificado de DENA, 2015).

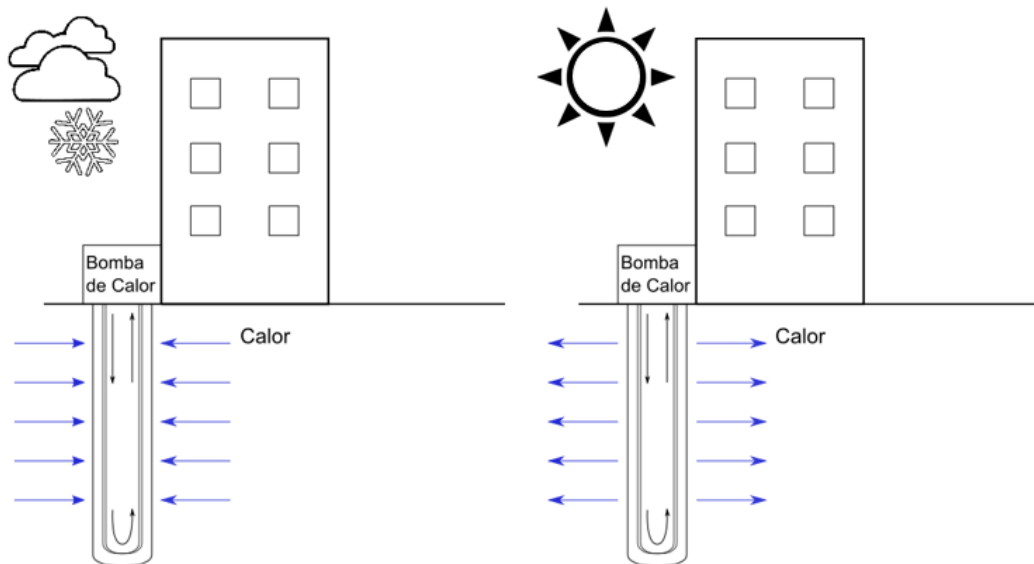


Figura 44. Esquema del funcionamiento de los sistemas geotérmicos genérico para calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha).

Si bien estos sistemas pueden llevar a una reducción considerable de gastos energéticos al largo plazo, la instalación lleva asociado un gran gasto inicial principalmente por la perforación, lo que representa una barrera de entrada que en muchos casos puede llevar a la decisión de no instalarlos.

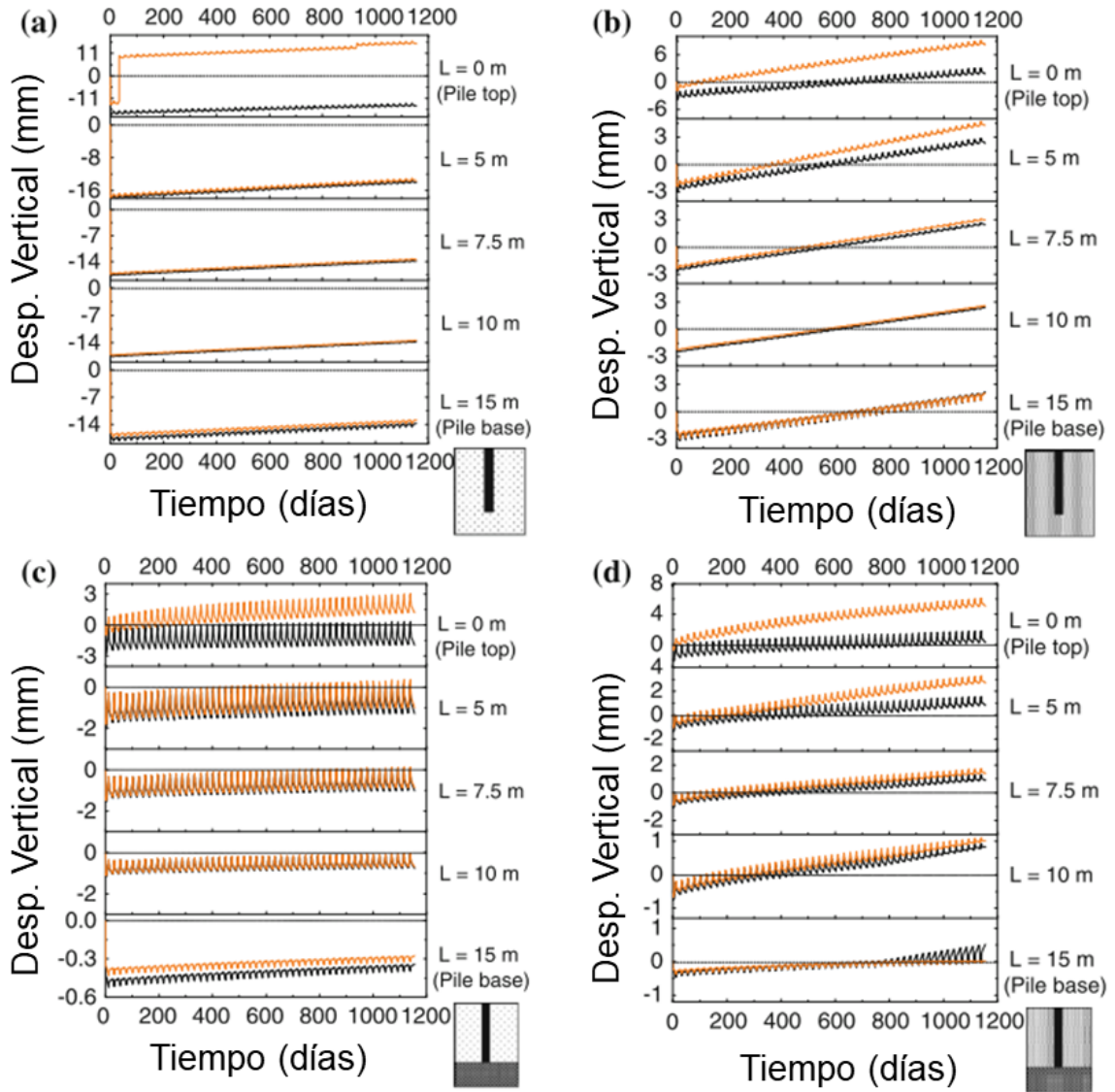
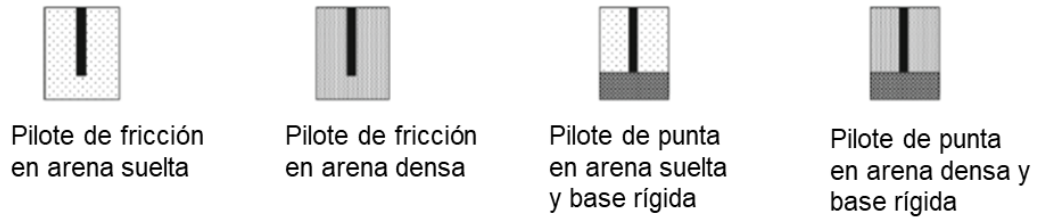
Lo anterior ha motivado la búsqueda de la integración de estos sistemas en estructuras cuya construcción sea imprescindible del punto de vista estructural, desarrollándose así la construcción de pilotes termo-activos, que cumplen características geométricas muy similares a los arreglos verticales de tuberías enterradas y que permiten reducir costos de instalación. En este marco, Brandl (2006) resume el estado del arte respecto de pilotes y estructuras termoactivas en general, donde destaca que, debido a las excelentes propiedades térmicas del suelo y hormigón, la instalación de estos sistemas de tuberías se puede realizar prácticamente en cualquier estructura que se encuentre embebida en el suelo.

Si bien el diseño de un pilote termo-activo resulta similar en muchas características a un sistema geotérmico convencional (*BHE* o *GHE*), la relación de aspecto geométrica que tiene un pilote difiere de la de una perforación con la tubería directamente embebida al suelo, por lo que se deben considerar modificaciones a los métodos comunes para medir in-situ las propiedades térmicas del sistema termo-activo (Franco, 2015). En este contexto, Muñoz (2011) y Guggisberg (2012) desarrollaron un ensayo de resistencia térmica, diseñado especialmente para cuantificar propiedades de temperatura en el contexto de fundaciones profundas. Este aparato es además fue utilizado para medir en pilas de entibación en el edificio Beauchef 851, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Estos trabajos se orientan principalmente en el análisis de las propiedades térmicas del suelo en virtud de diseñar sistemas que sean óptimos en su función de climatización, sin embargo, no consideran los posibles efectos que pudiera tener su incorporación en el desempeño de los pilotes desde la perspectiva de la serviciabilidad.

Con el objeto de comprender mejor el comportamiento termo-mecánico de la interacción suelo-pilote, se han realizado mediciones in situ, estudios experimentales, además de modelos numéricos y analíticos. Amatya et al.,(2012), Laloui (2011), Laloui et al., (2006) realizaron ensayos en pilotes de edificios en construcción, donde se impusieron cargas y ciclos de temperatura con el objeto de estudiar los esfuerzos y desplazamientos que se producen en la interfaz. En estos estudios se concluye que los ciclos de temperatura efectivamente afectan el comportamiento de los pilotes modificando la distribución de los esfuerzos de corte en profundidad, sin embargo, para los casos analizados no fueron necesarios cambios en los diseños originales de los pilotes.

Stewart y McCartney (2013) realizaron un modelo a escala en la centrífuga geotécnica, montaje que les permite controlar variables como el tipo de suelo y geometría, además de disminuir las incertidumbres asociadas a la instrumentación. Yavari et al., (2014) desarrollan un montaje a escala de un pilote enterrado en arena saturada, donde concluyen que bajo la aplicación de cargas verticales y ciclos de temperatura, se produce una secuencia de levantamientos y asentamientos de la cabeza del pilote que con el tiempo se traducen en un fenómeno de acumulación de desplazamientos, que pueden ser reversibles si las magnitudes de las cargas están bajo el 30% de la carga axial máxima, e irreversibles si se produce lo contrario. Sin embargo, Yavari et al. (2016), realizaron un montaje a escala de un pilote embebido en suelo arcilloso, donde concluyen que los asentamientos pueden ser irreversibles incluso con cargas inferiores al 30% de la carga máxima. Nguyen et al. (2017), realizaron un estudio experimental a escala pequeña de un pilote enterrado en arena seca, donde el sistema se somete a 30 ciclos de temperatura con el objeto de caracterizar el comportamiento termo-mecánico del pilote al largo plazo, destacando la ausencia de estudios que se enfoquen en este aspecto. En este trabajo se concluye que efectivamente se desarrollan asentamientos irreversibles por el efecto de la carga vertical más ciclos de temperatura. Además, la magnitud de este asentamiento dependerá de la magnitud de la carga aplicada. Por otro lado, destacan que el mayor asentamiento irreversible se produce en el primer ciclo de temperatura, evidenciando un comportamiento al largo plazo asintótico.

Saggu y Chakraborty (2015) realizaron modelos en elementos finitos en el software Abaqus, con el propósito de estudiar la influencia de los ciclos de temperatura en la interacción suelo-pilote, para ello realizan un modelo axisimétrico de un pilote embebido en arena, que es sometido a 50 ciclos de amplitud $\Delta T=18^{\circ}\text{C}$. Esto les permitió observar los cambios en el esfuerzo axial, el corte en la interfaz y los asentamientos del pilote. Los resultados Figura 45 muestran que los ciclos generan una acumulación de ascensiones del pilote, cuyo comportamiento depende de las condiciones de borde. Estos resultados, sin embargo, no se condicen con lo afirmado por los otros autores, que indican que bajo ciclos de temperatura, los pilotes tienden a asentarse, lo que podría explicarse en las condiciones de borde impuestos en la cabeza del pilote.



Carga Axial = 1000 kN
 Desplazamiento Nodo Pila
 Desplazamiento Nodo Suelo

Figura 45. Resultados de desplazamiento vertical en el tiempo para distintos tipos de pilote. Modificado de Saggi and Chakraborty (2015a).

Mimouni y Laloui (2014), aplicaron el modelo de Knellwolf et al. con el objetivo de estudiar las variaciones en la capacidad de soporte en pilotes geotérmicos, entendiendo que este fenómeno se produce principalmente por contracción y expansión del hormigón producto de cambios de temperatura. Para ello, comparan sus resultados con mediciones in situ de esfuerzo de corte y deformación, y además, distinguen en sus análisis tres casos: pilotes flotantes, semi-flotantes y en punta, donde los escenarios extremos corresponden al primero ($Q_{ult}^P = 0$) y el tercero ($S_{ult} = 0$). En este trabajo concluyen que efectivamente hay un efecto por temperatura en la capacidad de soporte de pilotes termo-activos, y que en ciertos casos el sobredimensionamiento del diseño de estas fundaciones por efectos de temperatura, pueden llevar a un mayor gasto económico que no se traduce en mejoras en la serviciabilidad de la estructura.

5.2 Metodología

Con el objetivo de estudiar la acumulación de desplazamientos inducidos térmicamente en una aplicación práctica, se propone analizar el comportamiento frente a ciclos de temperatura de un pilote termo-activo. Para esto, se construye un modelo axisimétrico como se muestra en la Figura 47, que es lo suficientemente alto y ancho para garantizar que la transferencia de calor en los bordes sea nulo (Rotta Loria et. al, 2015). El tipo de elemento utilizado es CAX4T, que corresponde a cuadriláteros de cuatro nodos, con acoplamiento de desplazamiento y temperatura e integración completa. Los elementos del pilote tienen un tamaño de 25cmx50cm, mientras que los del suelo de 50cmx50cm.

La magnitud de desplazamientos irreversibles producidos en la pila dependerá de la carga vertical aplicada sobre ésta (Nguyen et al., 2017), es por esto que uno de las variables a analizar corresponde al factor de seguridad del pilote. Por otro lado, con el objeto de observar las diferencias de comportamiento en función del tipo de pilote, se realiza el análisis de dos configuraciones: una en fricción principalmente o pilote flotante, con una relación entre la resistencia de fuste y de punta de $S_{ult} / Q_{ult}^P = 13$ (Figura 47a), y otra principalmente en punta con $S_{ult} / Q_{ult}^P = 0,4$ (Figura 47b). Los dos casos estudiados en este trabajo constituyen situaciones críticas que permiten establecer de mejor manera las diferencias en el comportamiento que pudieran ser observadas.

La capacidad de soporte última de las dos configuraciones posibles, se muestran en la Tabla 5, cuyos cálculos se adjuntan en el Anexo A. Las curvas de carga estimadas del modelo numérico se muestran en la Figura 48.

Tabla 5. Capacidad de soporte para los casos analizados, con los parámetros indicados en la Figura 47

Resistencia	Pilote flotante	Pilote en punta
De fuste	6850	4200
De punta	550	9800
Capacidad de soporte	7400	14000

Los parámetros seleccionados para el desarrollo del modelo de pilote termo-activo se muestran en la Tabla 6 En la Tabla 7 los valores seleccionados para la caracterización de la interfaz suelo-pilote. Debido a que la conductividad del suelo es inferior, será esta la que domine en el proceso de transferencia de calor.

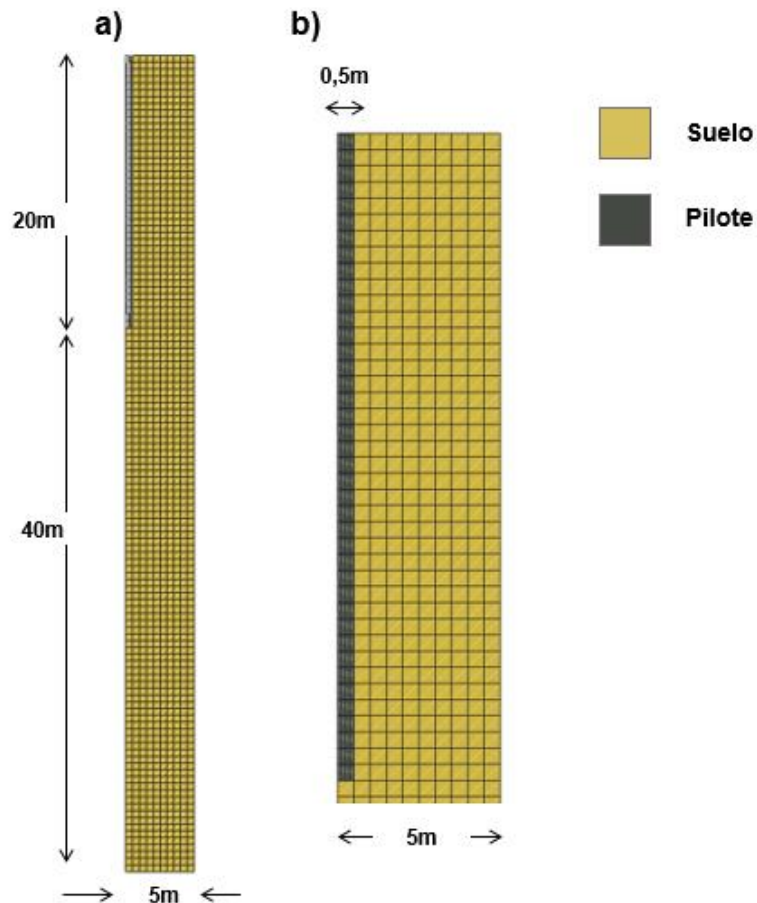


Figura 46. Modelo de elementos finitos. a) Modelo completo b) Detalle de la zona cercana al pilote

Tabla 6. Parámetros utilizados en los casos analizados, suelo 1 corresponde a las características del caso base del estudio

Parámetro	Unidad	Suelo Pilote Flotante	Suelo Pilote en Punta	Pilote
Densidad, ρ ⁽¹⁾	kg/m ³	1500	1600	2500
Módulo de elasticidad, E	MPa	40 ⁽¹⁾	60 ⁽¹⁾	3x10 ⁴ ⁽²⁾
Razón de Poisson, ν	-	0,2 ⁽²⁾	0,2 ⁽²⁾	0,33 ⁽²⁾
Coefficiente de expansión térmica, α	1/°C	0	0	10 ⁻⁵ ⁽³⁾
Conductividad térmica, κ ⁽⁴⁾	W/m°C	0,4	0,8	2,1
Capacidad térmica, C ⁽⁴⁾	J/°C	1500	1600	2000
Ángulo de fricción interna, ϕ ⁽¹⁾	°	15	35	-
Cohesión, c ⁽¹⁾	Pa	500	500	-

(1) De Budhu (2008)

(2) Saggi y Chakraborty (2015)

(3) Pastén y Santamarina (2014)

(4) Indicados por VDI 4640, 2004DI4640 (2004)

Tabla 7. Parámetros utilizados para la caracterización de la interfaz (Saggi y Chakraborty, 2015)

Parámetro	Unidad	Valor
Conductividad Térmica	W/m °C	k_{suelo}
Fricción Interfaz	°	$\tan(\phi)$
Desplazamiento Crítico Elástico	m	1x10 ⁻⁵
Rigidez normal interfaz	GPa	30

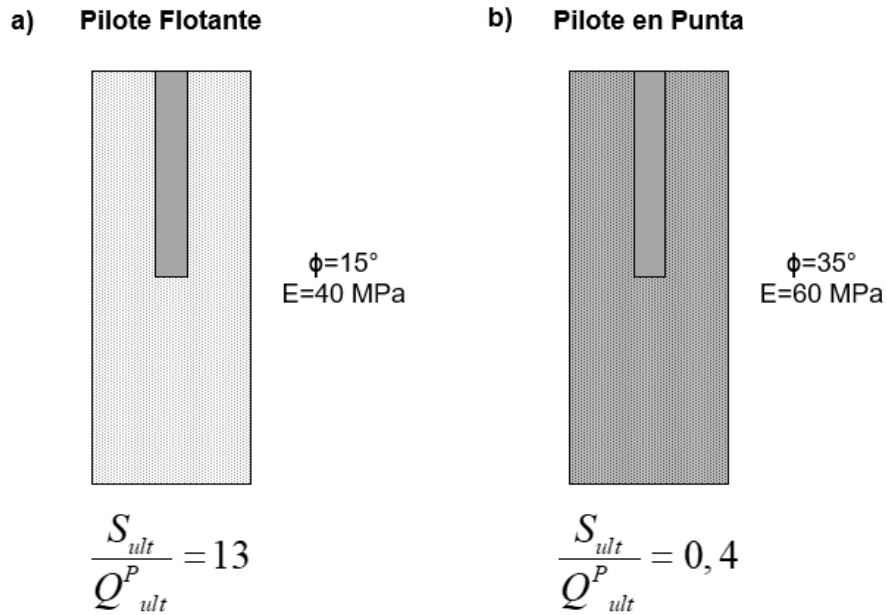


Figura 47. Configuraciones de tipo de pilote del estudio

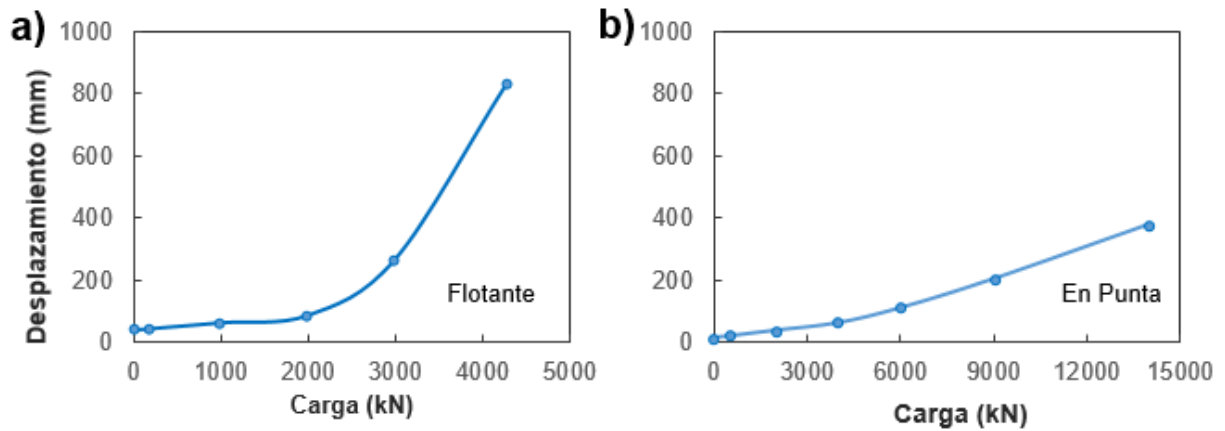


Figura 48. Curvas de carga obtenidas para los dos tipos de pilote, donde los desplazamientos se miden en la base de éstos

Por otro lado, y teniendo en cuenta las condiciones de operación de un pilote, se realiza la comparación de dos condiciones de borde de temperatura como se muestra en la Figura 49: la primera considera el cambio de temperatura en el fluido circulante en las tuberías y por consecuencia en el pilote mismo, fenómeno que de acuerdo a Ozudogru et al. (2014) puede asumirse como uniforme en toda su extensión (Figura 49a). Mientras que la segunda asume una serie de fluctuaciones de temperatura producto de la oscilación térmica ambiental (Figura 49b). El resumen de los casos estudiados se muestra en la Figura 50.

Los resultados obtenidos de este modelo corresponden a desplazamientos a lo largo del pilote y esfuerzos axiales. Además, se mide la temperatura en el modelo a lo largo del tiempo. Para estudiar el fenómeno de acumulación de desplazamientos, se utilizarán aquellos resultados correspondientes al desplazamiento en un nodo de la cabeza del pilote.

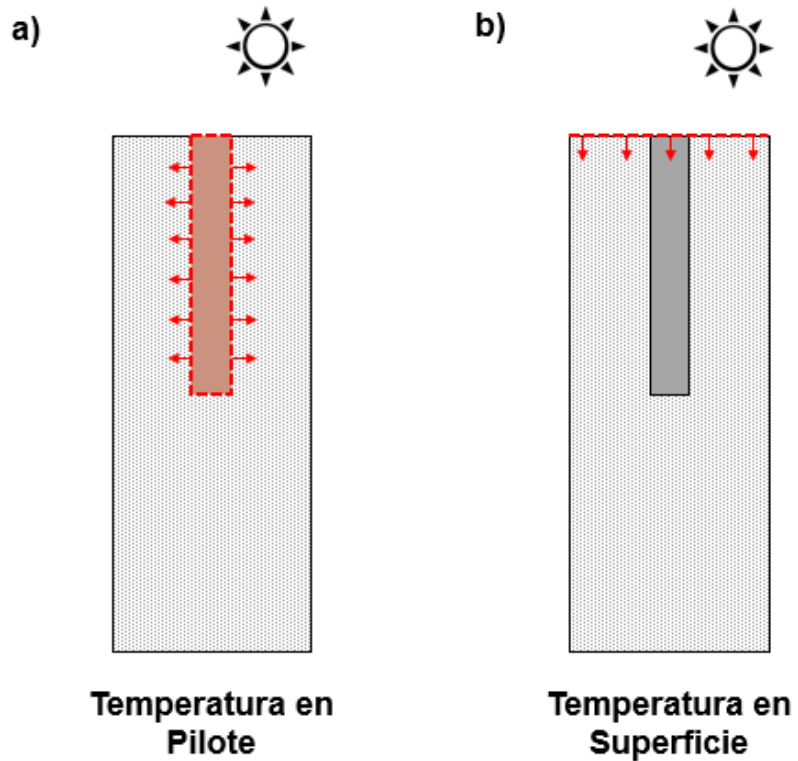


Figura 49. Condiciones de borde de temperatura analizadas en el estudio

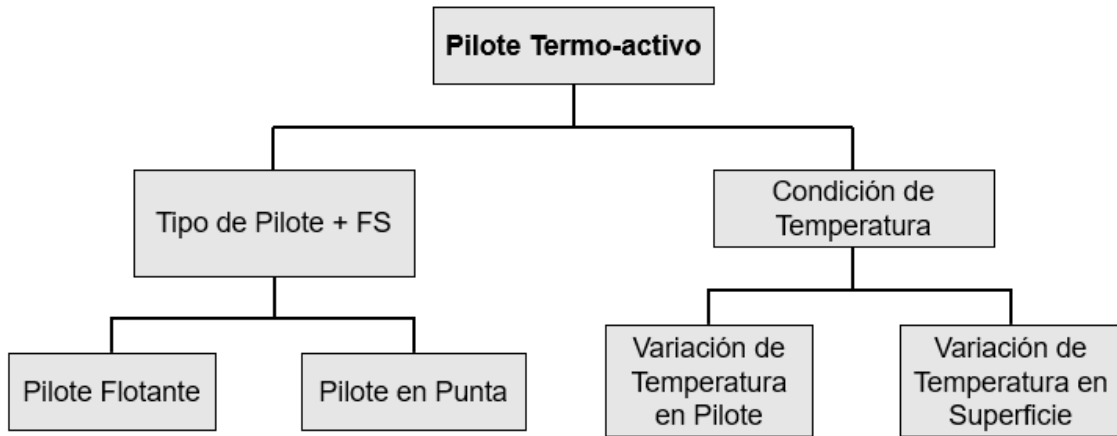


Figura 50. Resumen del estudio del caso práctico

Considerando los resultados obtenidos del presente estudio, se busca observar cómo la variación del coeficiente de expansión térmica del pilote influye en el desarrollo de desplazamientos irreversibles con los ciclos de temperatura. Por esta razón, se ejecutan modelos numéricos donde este parámetro varía, buscando analizar los casos más extremos. Por otro lado, y en virtud de que el objetivo de este análisis es identificar cómo este fenómeno puede llegar a afectar la serviciabilidad de estas estructuras en operación, se analiza el efecto de la variación del módulo de deformación del suelo, parámetro de relevancia para el cálculo de asentamientos elásticos admisibles en pilotes y fundaciones en general.

5.3 Resultados

Los resultados obtenidos de la modelación en elementos finitos de un pilote termo-activo muestran en todas sus configuraciones el desarrollo de expansión y contracción del pilote. El comportamiento general que tiene a lo largo del tiempo, depende del tipo de pilote y del factor de seguridad. En la Figura 51, se muestran los asentamientos medidos en la cabeza del pilote en el tiempo, producto de ciclos de temperatura sintéticos sinusoidales de periodo 1 día y amplitud 7.5°C , para tres factores de seguridad. De estos resultados se desprende que el pilote que trabaja principalmente en punta, acumula menores desplazamientos que el del pilote flotante. En la Figura 51a se observa un comportamiento asintótico, y que cerca de los 50 ciclos, la acumulación de desplazamientos es casi nula. Si bien en un pilote en punta la resistencia de fuste, es inferior, en este caso no es despreciable, representando alrededor del 40% de la capacidad última total, valor suficiente como para causar acumulación de deformaciones durante los primeros ciclos.

Por otro lado, el desarrollo de desplazamientos en el caso del pilote flotante (Figura 51b) es mayor, y, ante las mismas condiciones de temperatura, tardan más ciclos en estabilizar. En efecto, se observa que la disminución en el tiempo de la tasa de acumulación de desplazamientos es inferior al primer caso, por lo tanto, necesita más de 50 ciclos para estabilizar sus asentamientos por ciclos de temperatura. Para ambas configuraciones, el pilote con menor factor de seguridad tarda más tiempo en estabilizar los asentamientos y por ende es el que acumula mayores desplazamientos.

En la Figura 52 se observan los desplazamientos medidos en la cabeza de dos pilotes flotantes con $FS=2$ sometidos a diferentes condiciones de borde de temperatura. Para ambos casos se utilizan ciclos de temperatura sinusoidales de periodo 1 día y amplitud 7.5°C , uniforme en profundidad para el primer caso y solo en superficie para el segundo. Se observa que la condición de borde de temperatura que se define simulando que los ciclos que predominan son los ambientales, los desplazamientos son tan pequeños que no sobrepasan el rango elástico. Estos resultados se explican principalmente por la baja conductividad térmica del suelo, y, por lo tanto, no permite que las variaciones de temperatura afecten significativamente en profundidad, y por consecuencia, al pilote. Esto se puede verificar observando los contornos de temperatura en el tiempo para el caso de condición de borde ambiental, en Figura 52. Estos resultados validan el supuesto de la nula influencia de la temperatura superficial en el diseño de pilotes convencionales, ya que es evidente que ciclos de temperatura ambientales no generan ningún tipo de desplazamiento adicional al elástico. Por otro lado, si se observan los contornos de la Figura 54, se distingue un área de influencia mayor producto de las variaciones de temperatura al interior del pilote.

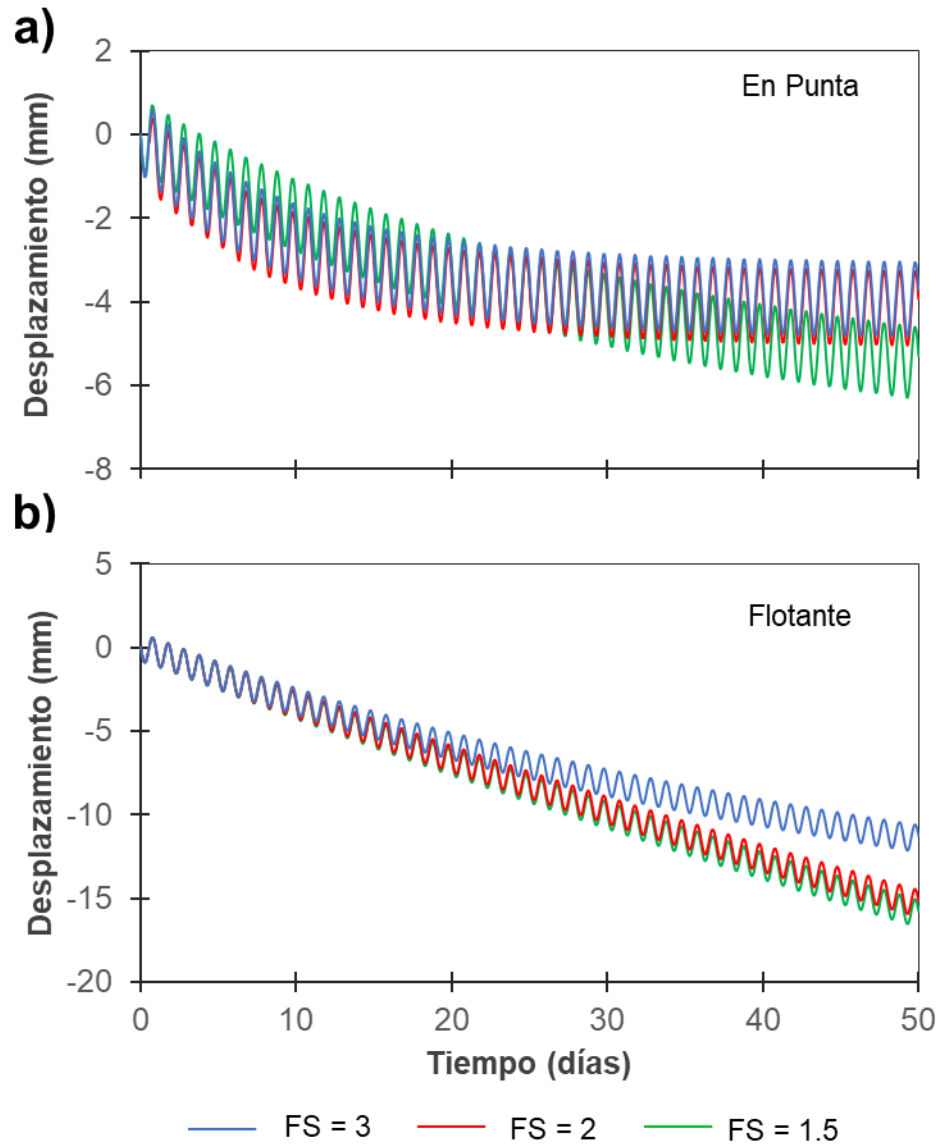


Figura 51. Desplazamiento de la cabeza del pilote en el tiempo, producto de la aplicación de cargas verticales variables (en función del FS) y de ciclos de temperatura de amplitud 7.5°C y periodo 1 día. a) Análisis para caso de pilote en punta y b) pilote flotante.

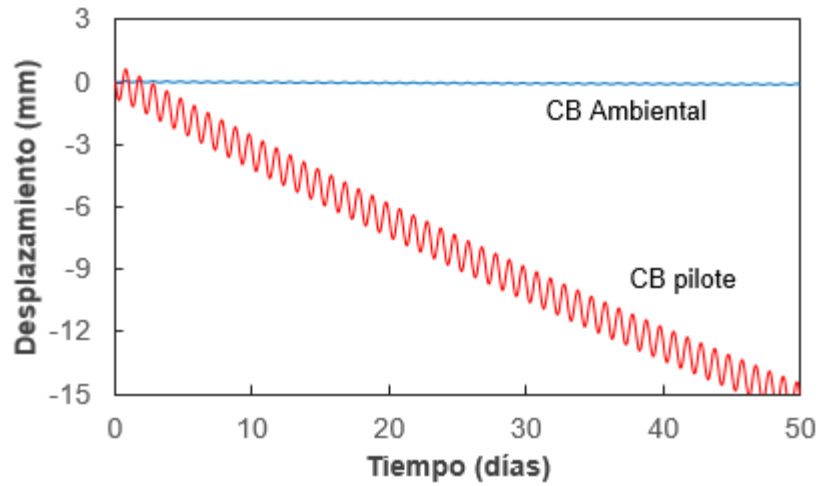


Figura 52. Desplazamientos medidos en la cabeza del pilote para dos condiciones de borde de temperatura diferentes: ciclos de temperatura ambientales y en el pilote. La configuración utilizada corresponde a la del Pilote flotante con FS=2. La condición de borde de temperatura es una sinusoide de periodo 1 día y amplitud 7.5°C.

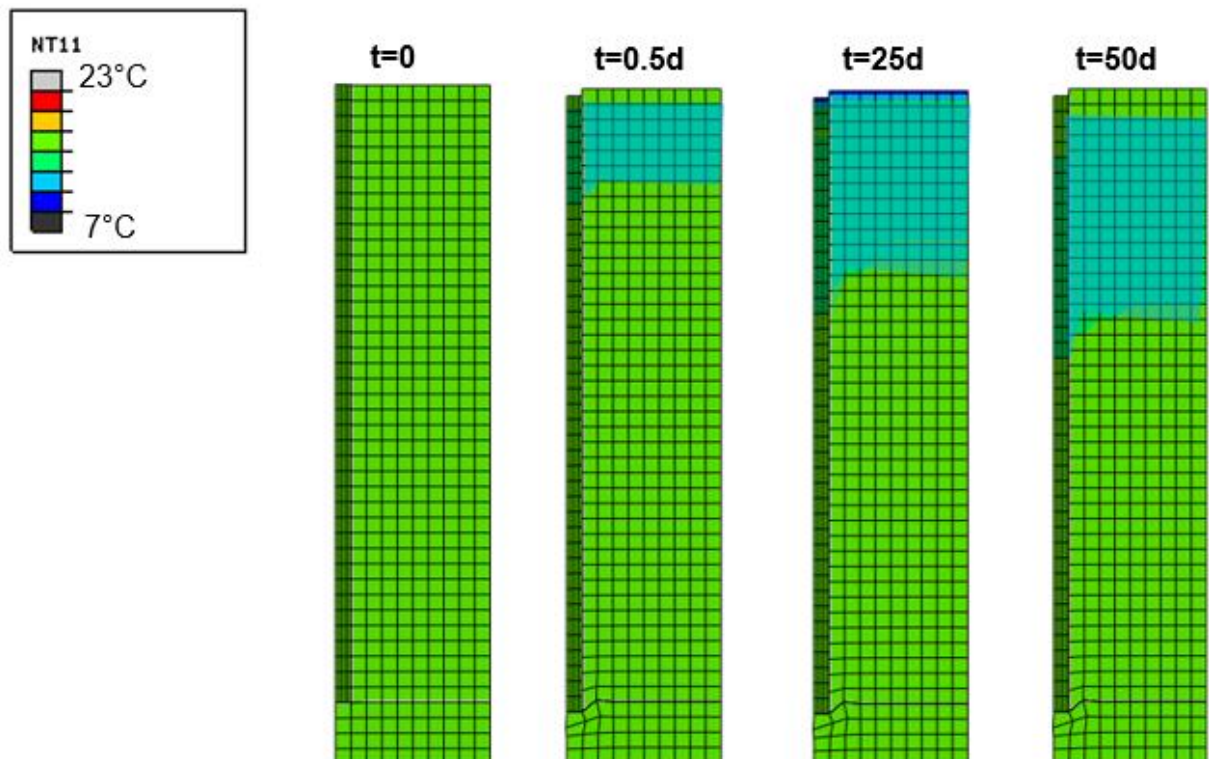


Figura 53. Perfil de temperaturas en el tiempo, en tiempo cero, medio día, 25 días y 50 días, para el caso con condición de borde ambiental.

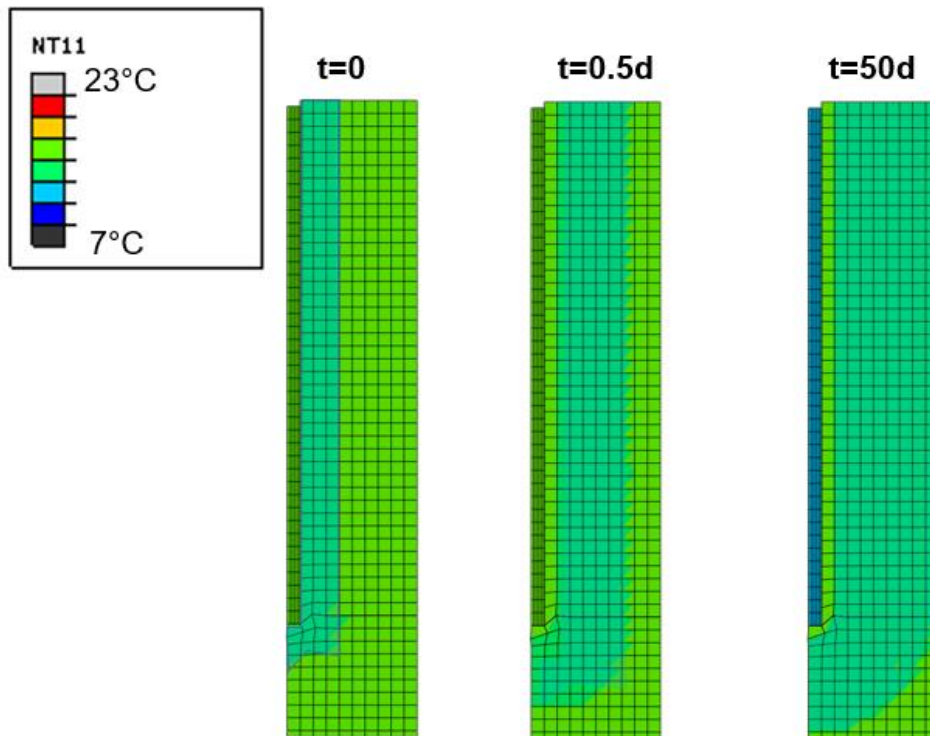


Figura 54. Contornos de temperatura en el tiempo, para el caso con condición de borde de temperatura en el pilote.

En la Figura 55 se muestran los resultados de tres modelos con distintos coeficientes de expansión térmica del pilote. De manera consistente con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, hay una fuerte dependencia de los asentamientos con este parámetro.

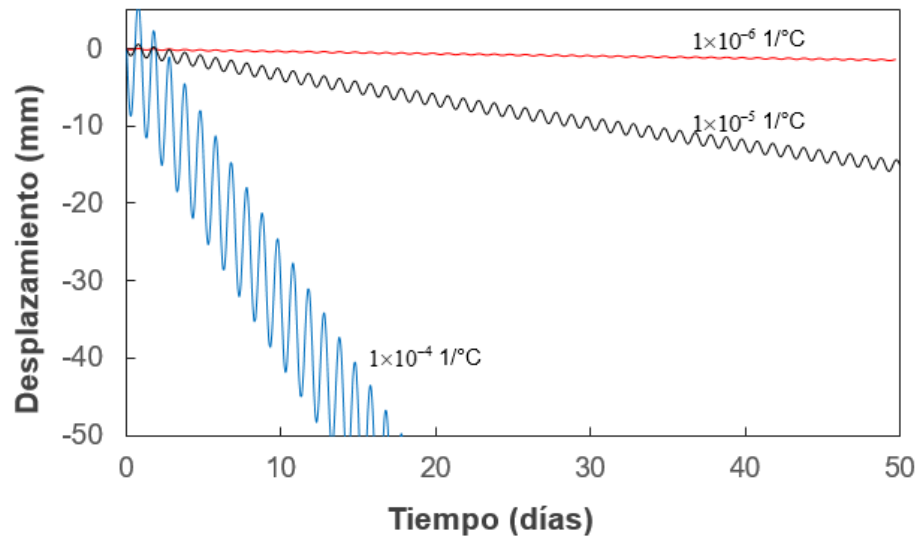


Figura 55. Efecto del coeficiente de expansión lineal del pilote en el fenómeno de acumulación de desplazamientos. Pilote flotante con FS=2 y condición de borde de temperatura sinusoidal de amplitud 7.5°C y periodo 1 día.

Si bien en los capítulos anteriores, se muestra el efecto casi nulo del módulo de elasticidad del acrílico en la acumulación de desplazamiento, esto se explica porque el montaje era del tipo horizontal, por ende la dirección del desplazamiento era perpendicular a la superficie de contacto. Lo que llevado al ejemplo de esta sección, se traduce al módulo del suelo que se encuentra rodeando el pilote, y no el que se encuentra bajo la punta de este, es decir, las condiciones de borde son diferentes.

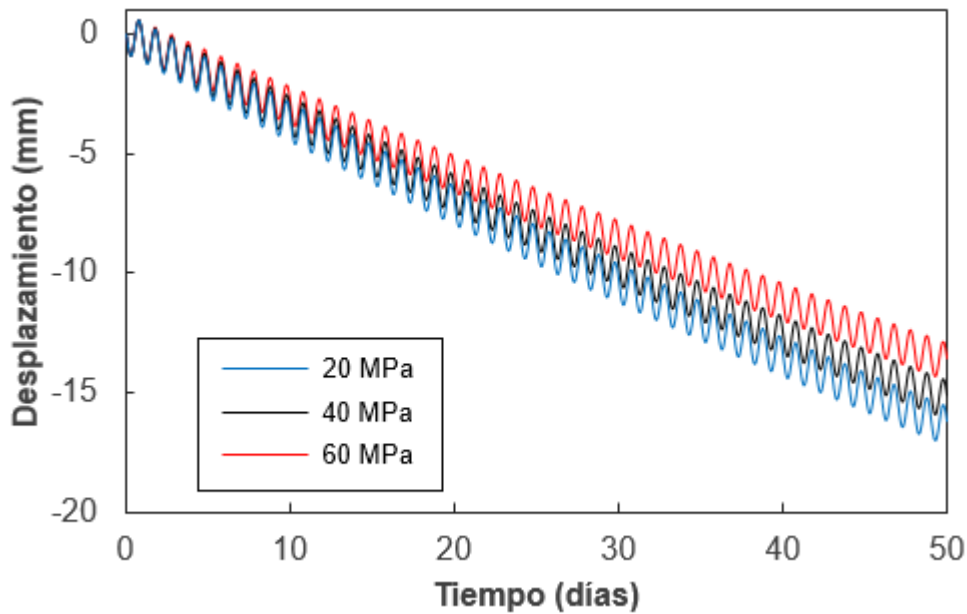


Figura 56. Efecto del módulo de elasticidad del suelo en la base del pilote

El efecto de la variación del módulo de elasticidad del hormigón se muestra en la Figura 57, donde se observa que a diferencia del montaje horizontal analizado, el sistema es más sensible a sus variaciones y que este parámetro es directamente proporcional a la acumulación de desplazamientos.

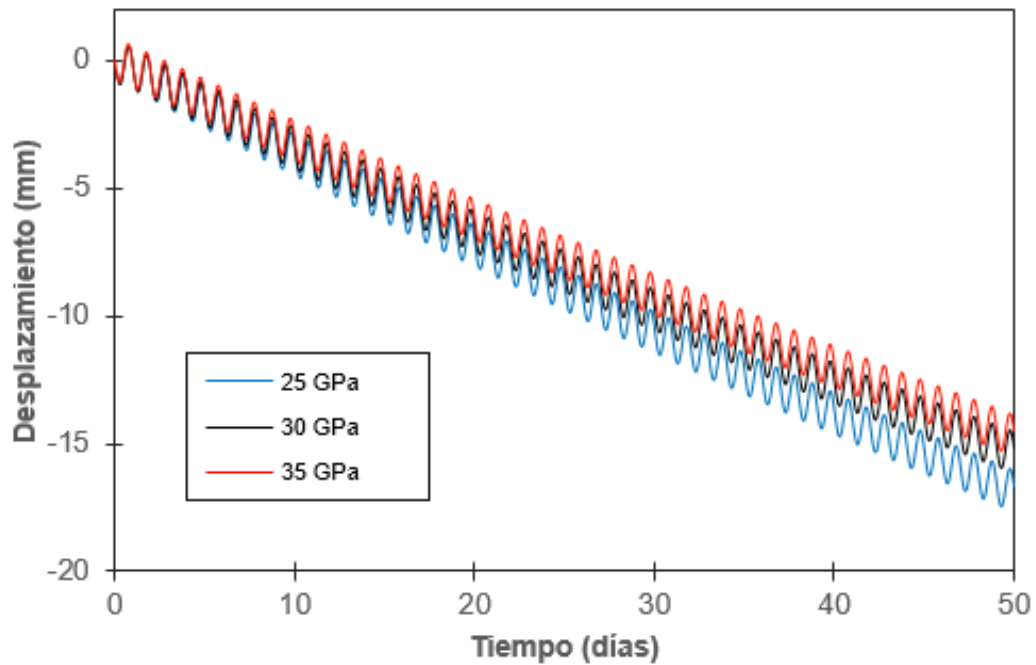


Figura 57. Influencia del módulo de elasticidad del pilote en la acumulación de desplazamientos. FS=2

Los resultados obtenidos del modelamiento numérico de un pilote termo-activo, permiten concluir que efectivamente se desarrolla la acumulación de desplazamientos irreversibles del pilote. Al caracterizar termo-mecánicamente los el suelo y el pilote, se puede afirmar que este fenómeno depende principalmente de los estados de carga a los que es sometida la estructura, la fricción de la interfaz, de las variaciones cíclicas de temperatura, y por último, pero no menos importante, el coeficiente de expansión térmica del hormigón y del suelo.

Si bien los resultados muestran desplazamientos del orden de varios milímetros (sobre todo en el caso del pilote flotante), estos valores se encuentran sobredimensionados con respecto a lo esperado en un pilote en condiciones normales de funcionamiento. Lo anterior debido principalmente a que este modelo no considera la restricción de desplazamiento que tiene una fundación al ser conectada a la estructura que soporta. Además, se debe considerar que los factores de seguridad acá analizados, corresponden a valores mucho más críticos (FS cercanos a 1) que los usuales en el diseño estático de fundaciones (FS \approx 3).

Un aspecto que en este modelo no es considerado, es el coeficiente de expansión de temperatura del suelo, lo que se justifica en dos razones. La primera, es que el comportamiento de las arenas secas puede ser analizado independiente de la temperatura dada su baja difusividad térmica. Y segunda, es que el suelo en estudio, al poseer una conductividad térmica baja, domina en la transferencia de calor en el contacto, no permitiendo que los cambios de temperatura en el suelo sean significativos. Esto se puede comprobar observando los contornos de temperatura de los modelos de ambas condiciones de borde (Figura 53 y Figura 54), que exhiben variaciones temporales muy pequeñas. Sin embargo, este supuesto no sería válido si se tratara de suelos con contenidos de agua importantes, o cuyo comportamiento mecánico si tuviera cierta dependencia de la temperatura, como los suelos más finos, con y sin plasticidad.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Esta tesis estudia el fenómeno de acumulación de desplazamientos en interfaces suelo-material, producto de ciclos de temperatura en condiciones críticas de esfuerzo, con el objeto de evidenciarlo, identificar aquellas variables que más influyen en su desarrollo y aplicarlo en un problema práctico real. Para ello, se desarrolla una serie de ensayos experimentales más una verificación numérica y analítica. El montaje experimental comprende un bloque de acrílico montado horizontalmente sobre suelo arenoso seco, y que mediante una carga que tira del bloque se define el factor de seguridad al deslizamiento. Además, este sistema es sometido a ciclos de temperatura al interior de una cámara térmicamente aislada. Se desarrolla una serie de 9 ensayos experimentales, en donde es posible observar el fenómeno a través del registro del desplazamiento de una cara del bloque. En cada prueba se modifican variables como el factor de seguridad al deslizamiento, amplitud y periodo de los ciclos de temperatura, coeficiente de roce de la interfaz. Todo esto con el objetivo de poder determinar los factores más influyentes en este fenómeno.

De los resultados obtenidos de los ensayos experimentales, se concluye que al someter a ciclos de temperatura un sistema en el que exista una interacción entre dos superficies rugosas y un estado de cargas en la dirección de la interfaz, se desarrollan desplazamientos en el sentido de aplicación de la carga, que con los ciclos van dejando un remanente que se acumula en el tiempo, fenómeno que se conoce como *ratcheting*. Además, la tasa de acumulación de los desplazamientos, es directamente proporcional a la amplitud de los ciclos, mientras que es inversamente proporcional al periodo de los ciclos y al Factor de Seguridad. También se concluye que bajo un mismo Factor de Seguridad, el coeficiente de fricción entre las superficies es irrelevante.

Por otro lado, el desarrollo del modelo numérico intenta reproducir lo obtenido experimentalmente, de tal manera de validar estos resultados, como de calibrar la caracterización de los parámetros termo-elásticos de los materiales e interfaz. Los resultados obtenidos de esta parte se consideran lo suficientemente similares como para afirmar que la caracterización realizada es la adecuada, y que tanto el fenómeno térmico como el mecánico han sido representados de manera satisfactoria.

Los resultados del modelo numérico permiten concluir que mediante un modelo sencillo termo-elástico, es posible reproducir de manera aceptable el fenómeno observado en laboratorio, es más, se verifican las hipótesis desarrolladas durante la etapa experimental. Por otro lado, el modelo numérico permite aislar ciertas variables que no pueden ser desacopladas durante los ensayos experimentales, como lo es la amplitud y periodo de ciclos al interior del bloque. Esto último permitió corroborar por separado la

proporcionalidad entre la acumulación de desplazamientos y la amplitud de los ciclos de temperatura, y la proporcionalidad inversa con el periodo.

Finalmente, el modelo analítico busca desarrollar una herramienta sencilla para reproducir el mismo fenómeno, resultado que se consigue en términos de comportamiento global, no así valores finales de desplazamiento. Se concluye que, este modelo representa una herramienta útil a la hora de analizar el fenómeno de manera relativamente rápida, ya que requiere una inversión menor de tiempo que el montaje experimental, y de menos recursos computacionales que el modelo numérico.

Con el objeto de aplicar estos resultados en un ejemplo práctico real, se ejecutan una serie de modelos en elementos finitos de un pilote termo-activo, donde se estudia el tipo de pilote y la condición de borde de temperatura, para así observar diferentes alternativas de operación. La caracterización es análoga a la del modelo del bloque de acrílico, salvo la incorporación de propiedades plásticas al suelo, dado el estado de carga en que trabaja este tipo de estructuras. Los resultados obtenidos concuerdan con lo revisado en la literatura, y muestran una fuerte dependencia de la magnitud de desplazamientos obtenidos, con el factor de seguridad, tanto para el caso de un pilote en fricción como en punta. Por otro lado, se observa que si se consideraran condiciones de temperatura ambientales, el efecto de los ciclos en los asentamientos es prácticamente nulo, dada la baja difusividad térmica del suelo, que no permite calentar el pilote o enfriarlo rápidamente. Por otro lado, para el caso de la condición de borde al interior del pilote, los asentamientos irreversibles son mayores, sin embargo, siguen sin afectar el desempeño en términos de serviciabilidad del pilote, ya que no superan los valores de asentamientos admisibles utilizados en la práctica.

Finalmente, las principales conclusiones que se pueden obtener de este trabajo son:

- Se evidencia que, bajo ciertas condiciones de esfuerzos, los ciclos de temperatura desencadenan la acumulación de desplazamientos relativos en interfaces suelo-material, y que, para el montaje experimental estudiado, el comportamiento que predomina es el lineal, pudiendo caracterizarlo a través de la tasa de acumulación de desplazamientos, que corresponde a la pendiente de la recta que mejor describa el ensayo.
- Los parámetros que influyen en este fenómeno son, el coeficiente de expansión lineal, el factor de seguridad, el módulo de elasticidad del suelo y del acrílico (o el sólido continuo que se encuentre en contacto con el suelo) y el periodo y amplitud de ciclos de temperatura. La tasa de acumulación de desplazamientos es proporcional al coeficiente de expansión térmica y a la amplitud de los ciclos de temperatura. Por otro lado, es inversamente proporcional al periodo de los ciclos, al factor de seguridad. En el caso del montaje horizontal estudiado, se concluye que el módulo de elasticidad del bloque y del suelo son prácticamente irrelevantes al igual que el coeficiente de fricción de la interfaz, donde el sistema es insensible siempre y cuando se mantenga el factor de seguridad. Los resultados del modelo analítico muestran que la tasa de acumulación de desplazamientos en función de los distintos parámetros analizados, guarda tendencias lineales o polinómicas de orden 2 de muy buen ajuste, lo que permite verificar las hipótesis sostenidas con anterioridad.
- Respecto al módulo de deformación del sólido, este influye en el comportamiento siempre y cuando haya un contacto normal en la dirección longitudinal de la estructura, por ejemplo, en el caso del pilote termo-activo, donde se observa la influencia que tiene en el comportamiento general, incluso siendo más importante que el factor de seguridad. Es por ello que, para este tipo de ejemplos, con el objeto de realizar comparaciones se propone definir la carga máxima en función de cierto nivel de asentamientos, y no de resistencia.
- En el ejemplo práctico estudiado, se concluye que los desplazamientos producto de las cargas termo-mecánicas en pilotes termo-activos, son relativamente bajas, y que estas posiblemente no incidan en el desempeño al largo plazo de estas estructuras, sin embargo, se destaca la importancia de estudiar este fenómeno, con el objetivo de evitar sobre-dimensionamientos por diseños excesivamente conservadores.
- Los resultados experimentales, numéricos y del modelo analítico suficientemente similares entre sí, lo que permite sostener que la caracterización realizada tanto de los materiales como de la interfaz, más las condiciones de borde seleccionadas, son adecuadas para representar fenómenos de este tipo.

6.2 Recomendaciones

Si bien este trabajo evidencia el desarrollo de desplazamientos relativos y su acumulación en interfaces suelo-material producto de ciclos de temperatura, existen diversas aristas que en este estudio no han sido abordadas, y que se dejan propuestas a futuras investigaciones.

- Mediciones en *in situ* de propiedades térmicas tanto del suelo como de un pilote, con el propósito de incluir la variabilidad propia del terreno.
- Instrumentación y monitoreo de temperatura en un pilote, con el propósito de mejorar los análisis numéricos, con data real y que permita realizar calibraciones.
- Modelos termo-hidro-mecánicos: a fin de incorporar la presencia de agua en los análisis, y de esta manera entender cómo se desarrolla este fenómeno suelos saturados o finos.
- Aplicación de esta metodología en problemas similares, como desplazamientos de discontinuidades de roca, tuberías enterradas o geosintéticos sobre taludes.

Bibliografía

Abaqus. *Abaqus version 6.13* 2013. Providence

Alonso-Marroquín, F., & Herrmann, H. J. (2004). Ratcheting of granular materials. *Physical Review Letters*, 92(5), 54301. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.054301>

Amatya, B. L., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermo-mechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6), 503–519. <http://doi.org/10.1680/geot.10.P.116>

Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122. <http://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>

Budhu, M. (2008). *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley & Sons.

Coyle, H. M., & Reese, L. C. (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Div.*, 92(2), 1–26.

Deutsche Energie-Agentur (DENA). (2017). Geothermal Energy.

Franco, A. (2015). *Análisis de sensibilidad numérica de tests de respuesta térmica (TRT) en pilotes geotérmicos*. Universidad de Chile.

Franco, A., Moffat, R., Toledo, M., & Herrera, P. (2016). Numerical sensitivity analysis of thermal response tests (TRT) in energy piles. *Renewable Energy*, 86, 985–992. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.019>

Fuenzalida Sepulveda, F. A. (2014). *Diseño y Evaluación de un Intercambiador de Calor para Recuperar Energía Geotérmica de muy Baja Entalpía*.

Guggisberg, G. (2012). *Perfeccionamiento del equipo thermal response test y estudio de rendimientos térmicos para el diseño de un sistema geotérmico de baja entalpía en sistemas de entibación*. Universidad de Chile.

Instruments, N. (2012). Measuring Position and Displacement with LVDTs. Retrieved August 15, 2016, from <http://www.ni.com/white-paper/3638/en/>

Johnston, I. W., Narsilio, G. A., & Colls, S. (2011). Emerging geothermal energy technologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 643–653. <http://doi.org/10.1007/s12205-011-0005-7>

Kishida, H., & Uesugi, M. (1987). Tests of the Interface between Sand Steel in the Simple Shear Apparatus. *Géotechnique*, 37(1), 45–52.

Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles, 137(October), 890–902. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000513](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000513).

Laloui, L. (2011). Geo-Frontiers 2011 © ASCE 2011 410. *Geo-Frontiers 2011*, (Advances in Geotechnical Engineering), 410–419.

Laloui, L., Nuth, M., & Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the

- behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763–781. <http://doi.org/10.1002/nag.499>
- Loria, A. F. R., Gunawan, A., & Ng, C. W. W. (2015). Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo- mechanical loads. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 1(June), 1–15. <http://doi.org/10.1016/j.gete.2015.03.002>
- Lund, J., & Boyd, T. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. In *Proceedings World Geothermal Congress* (pp. 25–29). <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.07.004>
- Martinez, A., & Frost, J. D. (2016). The influence of surface roughness on the compressive. *Géotechnique Letters*, 0, 304–307. <http://doi.org/10.1680/jgele.16.00169>
- Mimouni, T., & Laloui, L. (2014). Towards a secure basis for the design of geothermal piles. *Acta Geotechnica*, 9(3), 355–366. <http://doi.org/10.1007/s11440-013-0245-4>
- Muñoz, M. (2011). *Implementación de Pilas de entibación y sus Anclajes para el aprovechamiento geotérmico, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*. Universidad de Chile.
- Nguyen, V. T., Tang, A. M., & Pereira, J. M. (2017). Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand. *Acta Geotechnica*, (accepted). <http://doi.org/10.1007/s11440-017-0539-z>
- O'Rourke, T. D., Druschel, S. J., & Netravali, A. N. (1990). Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(3), 451–469. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:3\(451\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:3(451))
- Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., & Arson, C. F. (2014). Analysis of friction induced thermo-mechanical stresses on a heat exchanger pile in isothermal soil. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, (Thermo-mechanical response of soils, rocks and energy geostructures).
- Pastén, C., García, M., & Cortes, D. D. (2015). Physical and numerical modelling of the thermally induced wedging mechanism. *Géotechnique*, 5(April-June), 186–190.
- Pastén, C., García, M., & Santamarina, J. C. (2015). Thermo-mechanical ratcheting in jointed rock masses. *Géotechnique Letters*, 5(April-June), 86–90. <http://doi.org/10.1680/geolett.14.00118>
- Pastén, C., & Santamarina, J. C. (2014). Experimental and numerical modeling of thermally-induced ratcheting displacement of geomembranes on slopes, (6), 334–341.
- Pastén, C., & Santamarina, J. C. (2014). Thermally Induced Long-Term Displacement of Thermoactive Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5), 6014003. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001092](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001092)
- Potyondy, J. G. (1961). Skin Friction between Various Soils and Construction Materials. *Géotechnique*, 11, 339–353. <http://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.339>

- Saggu, R., & Chakraborty, T. (2015). Cyclic Thermo-Mechanical Analysis of Energy Piles in Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(2), 321–342. <http://doi.org/10.1007/s10706-014-9798-8>
- Seisdedos, M. (2012). *Geotermia de baja entalpía*. Universidad de Chile.
- Sheng, D., Wriggers, P., & Sloan, S. W. (2007). Application of Frictional Contact in Geotechnical Engineering. *International Journal of Geomechanics*, 7(June), 176–185. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:3\(176\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:3(176))
- Stewart, M. A., & McCartney, J. S. (2013). Centrifuge Modeling of Soil-Structure Interaction in Energy Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001061](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001061).
- Thomas, H. R., & Rees, S. W. (2009). Measured and simulated heat transfer to foundation soils. *Geotechnique*, 59(4), 365–375. <http://doi.org/10.1680/geot.2008.59.4.365>
- Vega, A., & McCartney, J. S. (2015). Cyclic heating effects on thermal volume change of silt. *Environmental Geotechnics*, 2(1968), 257–268.
- Vieira, A., & Maranha, J. R. (2016). Thermoplastic Analysis of a Thermoactive Pile in a Normally Consolidated Clay. *International Journal of Geomechanics*, 1–21. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000666](http://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000666).
- Wriggers, P. (2006). *Computational contact mechanics, second ed.*, Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-32609-0>
- Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2016a). Effect of temperature on the shear strength of soils and soil/structure interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(January), 1186–1194. <http://doi.org/10.1139/cgj-2015-0355>
- Yavari, N., Tang, A. M., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2016b). Mechanical behaviour of a small-scale energy pile in saturated clay. *Géotechnique*, 66(11), 878–887. <http://doi.org/10.1680/jgeot.15.T.026>
- Yavari, N., Tang, A., Pereira, J. M., & Hassen, G. (2014). Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling. *Acta Geotechnica*, 9(3), 385–398. <http://doi.org/DOI 10.1007/s11440-014-0310-7>

Anexo A – Memoria de Cálculo de Capacidad de Soporte Pilotes

Método β (Ref: Budhu, M. (2008). *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS*, (With CD). John Wiley & Sons.)

Datos Pilote: *Pilote en fricción*

$L := 20 \text{ m}$ Largo Pilote

$D := 1 \text{ m}$ Diámetro Pilote

$\gamma := 2500 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ Peso unitario hormigón

$\gamma_s := 1500 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ Peso unitario suelo arenoso seco

$\phi := 15 \text{ deg}$ Ángulo fricción interna del suelo

$E := 40 \text{ MPa}$ Módulo de elasticidad del suelo

$W := \gamma \cdot \left(L \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{2} \right) = 770.212 \text{ kN}$ Peso del Pilote

Fuste:

$perim := \pi \cdot 2 \cdot \frac{D}{2} = 3.142 \text{ m}$ $K_o := 1 - \sin(\phi) = 0.741$

$Q_s := perim \cdot K_o \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot L^2 \right) = 6850 \text{ kN}$

Punta:

$\psi := \frac{\pi}{5}$ $A_p := \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 0.785 \text{ m}^2$ Área Pilote

$N_q := \left(\tan(\phi) + \sqrt{1 + \tan(\phi)^2} \right)^2 \cdot e^{2 \cdot \psi \cdot \tan(\phi)} = 2.378$ Propuesto por Janbu (1976)

$Q_p := N_q \cdot \gamma_s \cdot L \cdot A_p = 549.546 \text{ kN}$ $\frac{Q_s}{Q_p} = 12.5$

$Q_{ult} := Q_p + Q_s = 7400 \text{ kN}$ Capacidad de soporte última

Método β (Ref: Budhu, M. (2008). *SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS*, (With CD). John Wiley & Sons.)

Datos Pilote: *Pilote en punta*

$L := 20 \text{ m}$ Largo Pilote

$D := 1 \text{ m}$ Diámetro Pilote

$\gamma := 2500 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ Peso unitario hormigón

$\gamma_s := 1600 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ Peso unitario suelo arenoso seco

$\phi := 35 \text{ deg}$ Ángulo fricción interna del suelo

$E := 60 \text{ MPa}$ Módulo de elasticidad del suelo

$W := \gamma \cdot \left(L \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{2} \right) = 770.212 \text{ kN}$ Peso del Pilote

Fuste:

$perim := \pi \cdot 2 \cdot \frac{D}{2} = 3.142 \text{ m}$ $Ko := 1 - \sin(\phi) = 0.426$

$areab := perim \cdot L = 62.832 \text{ m}^2$

$Qs := perim \cdot Ko \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot L^2 \right) = 4204 \text{ kN}$

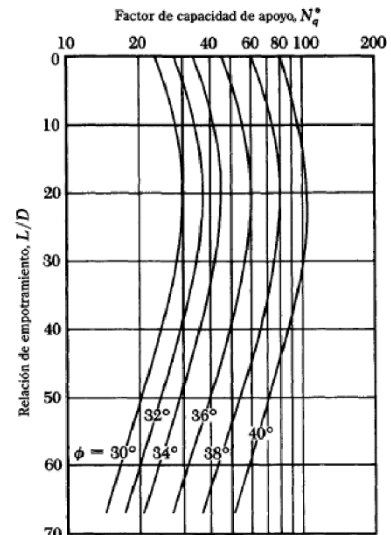
Punta:

$Ap := \pi \cdot \frac{D^2}{4} = 0.785 \text{ m}^2$ Área Pilote

$Nq := 40$ Propuesto por Coyle y Castelo (1981)

$Qp := Nq \cdot \gamma_s \cdot L \cdot Ap = 9859 \text{ kN}$ $\frac{Qs}{Qp} = 0.426$

$Qult := Qp + Qs = 14062.71 \text{ kN}$ Capacidad de soporte última



▼ FIGURA 9.16 Variación de N_q^* con L/D (según Coyle y Castelo, 1981)