

## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO** PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL – GEOTECNIA

## CURVAS DE TRANSFERENCIA DE CARGA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO NUMÉRICO DE PILAS DE ENERGÍA

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE: MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA: KITZIA JUDITH ARIZMENDI LÓPEZ

TUTORA PRINCIPAL: DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ABRIL 2021



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

### DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

### JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Gabriel Auvinet Guichard
Secretario:	Dr. Rigoberto Rivera Constantino
Vocal:	Dra. Norma Patricia López Acosta
1 er. Suplente:	M.I. Agustín Deméneghi Colina
2 do. Suplente:	M.I. Walter Iván Paniagua Zavala

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

## **TUTORA DE TESIS:**

DRA. NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA

\_\_\_\_\_

FIRMA

A Dios por tantas bendiciones a lo largo de este camino

A mi madre por estar conmigo hasta el día de hoy y todo su cariño.

A mis hermanos por darme la razón más importante para seguir adelante.

A mi padre por continuar trabajando para brindarnos su apoyo.

A mi familia...

A la Dra. Norma Patricia López Acosta por la dedicación, el apoyo y todo el conocimiento compartido durante la realización de este trabajo.

A los sinodales Dr. Gabriel Auvinet Guichard, Dr. Rigoberto Rivera Constantino, M.I. Agustín Deménegui Colina y M. I. Walter Paniagua Zavala por su contribución en la revisión de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para poder continuar mis estudios.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme un espacio de trabajo y la beca otorgada para la culminación de esta tesis.

A mis amigos por sus palabras de aliento en cada etapa de este trayecto.

# ÍNDICE

ÍNI	DICE D	E FIGURAS	
ÍNI	DICE D	E TABLAS	
RE	SUMEN	1	
AB	STRAC	Т	
1.	INTRO	DDUCCIÓN	1
2.	ESTAI	DO DEL ARTE	5
2	.1. Cons	ideraciones generales	5
2	.2. ¿Ç	ué son las pilas de energía?	6
2	.3. Es	tudios experimentales en pilas de energía1	0
	2.3.1.	Pruebas de carga <i>in situ</i> 1	0
	2.3.2.	Modelos en centrífuga1	5
2	.4. Co	omportamiento termo-mecánico de las pilas de energía1	7
	2.4.1.	Respuesta ante cargas térmicas1	8
	2.4.2.	Respuesta ante cargas termo-mecánicas2	0
3.	MÉTC	DOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO PARA PILAS DE ENERGÍA2	3
3	.1. Méto	odos de análisis	4
	3.1.1.	Reglas empíricas2	4
	3.1.2.	Curvas de transferencia de carga2	4
	3.1.3.	Modelos numéricos con elementos finitos	8
3	.2. M	étodos de diseño4	0
	3.2.1.	Diseño de pilas de energía con base en los Eurocódigos4	0
	3.2.2.	Diseño de pilas convencionales con base en las NTCDCC-20174	4
	3.2.3. energía	Propuesta de adaptación de las recomendaciones para diseño de pilas de con base en los Eurocódigos a las NTCDCC-2017 de México4	.8
	3.2.4.	Diseño estructural de pilas de energía4	9
	3.2.5. energía	Metodología propuesta para el diseño geotécnico y estructural de pilas de5	1
4. PIL	APLIC LAS DE	CACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE ENERGÍA EN MÉXICO5	3
4	.1. In	troducción	3
4	.2. Lo	calización del caso de estudio5	4

4.3.	Mo	delo geotécnico
4.3	.1.	Estratigrafía del sitio
4.3	.2.	Propiedades del suelo
4.4.	Des	cripción de la pila de energía analizada57
4.4	.1.	Dimensiones y propiedades del concreto
4.4	.2.	Cargas aplicadas
4.5.	Dise	eño geotécnico de la pila de energía60
4.5	.1.	Estado límite de falla60
4.5	.2.	Estado límite de servicio
4.6.	Dis	eño estructural de la pila de energía65
5. CC	ONCL	USIONES Y RECOMENDACIONES
5.1.	Cor	nclusiones
5.2.	Rec	comendaciones
REFEF	RENC	CIAS
ANEX	0 I. C	CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CARGA
PROPU	JEST	O PARA EL ANÁLISIS TERMO-MECÁNICO77
ANEX	0 <b>II</b> .	CÓDIGO EPILES IMPLEMENTADO PARA EL CÁLCULO TERMO-
MECA	NICO	D DE PILAS DE ENERGIA87

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de operación del sistema de pilas de energía: (a) extracción de energía y (b) almacenamiento de energía (adaptado de Suryatriyastuti <i>et al.</i> , 2012) 6
Figura 2.2. Componentes de una bomba de calor geotérmico (BCG) para el caso de pilas de energía (adaptado de LAFARGE, 2013)
Figura 2.3. Configuraciones más comunes para tuberías de conducción (adaptado de Gao <i>et al.</i> , 2008)      8
Figura 2.4. Valores de la temperatura media de la pila durante las siete etapas de construcción (adaptado de Laloui <i>et al.</i> , 2003)
<ul><li>Figura 2.5. (a) Movimiento de la pila durante ciclo de calentamiento-enfriamiento;</li><li>(b) Esfuerzos verticales termo-mecánicos en la pila (adaptado de Laloui <i>et al.</i>, 2006) 12</li></ul>
Figura 2.6. Respuesta observada en una pila de energía en Lambeth College (adaptado de Bourne-Webb <i>et al.</i> , 2013)
Figura 2.7. Perfiles de (a) Carga térmica máxima (b) Deformación térmica máxima durante pruebas individuales (adaptado de Mimouni y Laloui, 2015)
Figura 2.8. Perfiles de (a) Carga térmica máxima (b) Deformación térmica máxima durante prueba de grupo (adaptado de Mimouni y Laloui, 2015)
Figura 2.9. Modelo a escala de pila de energía e instrumentación (adaptado de Stewart y McCartney, 2014)
Figura 2.10. Resultados de prueba: a) Esfuerzos térmicos verticales b) Desplazamiento térmico en la cabeza durante ciclos de calentamiento- enfriamiento (adaptado de Stewart y McCartney, 2014)
Figura 2.11. Perfiles axiales térmicos de una pila de punta: (a) instalada en arena de Nevada, SP (b) instalada en limo de baja compresibilidad, ML (adaptado de Goode <i>et al.</i> ,2015)
Figura 2.12. Curva carga-desplazamiento de una pila de energía semi-flotante instalada en limo de baja compresibilidad, ML (adaptado de Goode <i>et al.</i> , 2015) 17
Figura 2.13. Respuesta térmica durante etapa de calentamiento: (a) Cuerpo libre (b) Cuerpo restringido (adaptado de Bourne-Webb <i>et al.</i> , 2013)

Figura 2.14. Efecto de las condiciones de frontera en la respuesta térmica durante la etapa de calentamiento: (a) sin restricciones en los entremos (b) con restricciones en los extremos. (adaptado de Bourne-Webb <i>et al.</i> , 2013)
Figura 2.15. Comportamiento termo-mecánico en una pila de fricción: (a) Calentamiento (b) Enfriamiento (adaptado de Soga y Rui, 2016)
Figura 2.16. Comportamiento termo-mecánico en una pila de punta: (a) Calentamiento (b) Enfriamiento (adaptado de Soga y Rui, 2016)
Figura 3.1. Curvas de transferencia de carga propuestas por Frank y Zhao (1982): (a) evolución de la resistencia a la fricción movilizada ts con respecto al desplazamiento de la pila, (b) evolución de la reacción en la base movilizada tb respecto al desplazamiento de la pila
<ul> <li>Figura 3.2. Modelo de diferencias finitas parra pilas de energía:</li> <li>(a) Modelo para carga mecánica (<i>zi</i>: desplazamiento del segmento de pila <i>i</i>),</li> <li>(b) modelo de carga térmica (<i>zi</i>: desplazamiento del segmento de pila <i>i</i>) (modificado de Knellwolf et al, 2011)</li></ul>
Figura 3.3. Esquema de un elemento de la pila, Qb, M es la fuerza axial actuando en el fondo, Qs, M es la fuerza aplicado en la zona lateral del segmento, Qt, M es la fuerza axial en la cabeza (modificado de Chen y McCartney, 2016)
Figura 3.4. Modelo de diferencias finitas para pilas de energía: (a) Modelo de carga térmica (zi: desplazamiento del segmento de pila i), (b) fuerzas externas movilizadas por carga térmica (modificado de Knellwolf <i>et al</i> , 2011) 30
Figura 3.5. Diagrama de flujo del algoritmo programado en Matlab ® para análisis y diseño de pilas de energía
Figura 3.6. Diagrama del módulo mecánico programado en Matlab ®
Figura 3.7. Diagrama de flujo del módulo termo-mecánico programado en Matlab ® 38
Figura 3.8. Clasificación de las acciones variables dependiendo de su frecuencia (adaptado de Gulvanessian, 2001)
Figura 3.9. Temperaturas operativas medias de la pila desde 2012 (modificado de Loveridge <i>et al</i> , 2016)

Figura 3.10 Diagrama de interacción para estructuras de concreto 51
Figura 3.11. Metodología propuesta para el diseño geotécnico y estructural de pilas de energía
Figura 4.1. Distribución de la cimentación (Rojas, 2016) 54
Figura 4.2. Perfil estratigráfico de la zona de estudio
Figura 4.3. Relación entre la longitud y el factor de desplazamiento de una placa infinitamente rígida que descansa sobre un semiespacio elástico semi infinito
Figura 4.4. Curvas carga-desplazamiento en la cabeza de la pila
Figura 4.5. Desplazamiento vertical en la pila: (a) Combinación 1, (b) Combinación 2 y (c) Combinación 3
Figura 4.6. Distribución de carga axial con la profundidad: (a) Combinación 1, (b) Combinación 2 y (c) Combinación 3
Figura 4.7. Desplazamiento vertical en la pila: (a) Combinación 4 y (b) Combinación 5
Figura 4.8. Diagrama de interacción obtenido con el programa Response 2000 66
Figura I.1. Comparación de resultados en caso Foxta: (a) Fuerza axial movilizada b) Esfuerzos verticales en la pila, Foxta ®
Figura I.2. Comparación de resultados obtenidos: (a) Fuerza axial movilizada b) Deformaciones en la pila, Lambeth College
Figura I.3. Comparación de resultados obtenidos: (a) Fuerza axial movilizada b) Resistencia a la fricción en la pila, Lambeth College
Figura I.4. Comparación de resultados en caso EPFL: (a) Fuerza axial en T7 b) Deformaciones en la pila en T1
Figura I.5. Comparación de resultados en caso Knellwolf <i>et al</i> : (a) Fuerza axial b) Esfuerzos Termo-mecánicos en pila flotante

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Factores de combinación empleados en las diferentes combinaciones de accionespara Estado Límite de Falla y de Servicio
Tabla 3.2. Valor de Nmáx y Nmín para el cálculo de Nq* (NTCDCC, 2017)       48
Tabla 3.3. Equivalencias de diseño entre las NTCDCC (2017) y los Eurocódigos
Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de los materiales empleadas en el análisis
Tabla 4.2. Propiedades térmicas del suelo de Santa Fe (modificadas Portillo, 2019)
Tabla 4.3. Propiedades mecánicas de la pila empleadas en el modelo de transferencia decarga
Tabla 4.4. Resumen de cargas termo-mecánicas de diseño utilizadas en el modelode transferencia de carga59
Tabla 4.5. Resumen de combinaciones para estados límite de falla y de servicio60
Tabla 4.6. Revisión por estado límite de falla
Tabla 4.7. Revisión por estado límite de servicio    65
Tabla 4.8. Resultados de cálculo de refuerzo longitudinal y transversal
Tabla I.1. Propiedades mecánicas de los materiales, calibración de Foxta ®       78
Tabla I.2. Propiedades mecánicas de los materiales, calibración de Lambeth College 80
Tabla I.3. Propiedades mecánicas de los materiales, calibración de EPFL       82
Tabla I.4. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la calibración del casoKnellwolf et al., (2011)84

## RESUMEN

Las pilas de energía son un tipo especial de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) de sistema cerrado, en las que se instalan tuberías de intercambio de calor en el elemento de cimentación para transportar la energía térmica del/al suelo. Debido a su alta eficiencia energética y al uso de energías renovables, las pilas de energía son una opción viable desde el punto de vista técnico y ambiental para responder al creciente consumo de energía para la climatización de edificios en México. Sin embargo, en el país no existen códigos de diseño que reúnan todos los aspectos que influyen en su comportamiento y los requerimientos de servicio de este tipo de estructuras.

En este contexto, el objetivo principal de esta tesis de maestría es realizar el diseño geotécnico y estructural de una pila de energía mediante el algoritmo numérico *EPiles*, implementado en esta tesis en lenguaje Matlab ®, y fundamentado en curvas de transferencia de carga. Para ello, inicialmente se exponen los aspectos más relevantes del comportamiento de las pilas de energía sometidas a diferentes condiciones de carga, con énfasis en los efectos de la temperatura.

En la parte principal de este trabajo, se presenta el estado actual del conocimiento sobre la respuesta termo-mecánica de las pilas de energía, así como diversos métodos de análisis y diseño propuestos en la literatura internacional para este tipo de estructuras. En particular, se explican los conceptos básicos para la aplicación de las curvas de transferencia de carga en sistemas tradicionales y los cambios requeridos para considerar los efectos térmicos en las pilas de energía. Posteriormente, se adaptan las recomendaciones de diseño para integrar el efecto de los cambios de temperatura en la respuesta mecánica de las pilas de energía basadas en los Eurocódigos a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones vigentes en México (NTCDCC, 2017). Adicionalmente, la metodología del modelo de transferencia de carga propuesto se aplica al diseño geotécnico y estructural de un caso práctico-hipotético de una pila de energía construida en un sitio particular de la Ciudad de México.

Por último, se dan conclusiones y recomendaciones derivadas de los análisis realizados. Como parte de las recomendaciones, se resaltan algunos aspectos relevantes que se deben investigar adicionalmente para mejorar el análisis numérico de pilas de energía.

El programa *EPiles* propuesto en este trabajo representa una herramienta útil para cimentar las bases para el diseño de pilas de energía en México.

## ABSTRACT

Energy piles are a special type of closed system Geothermal Heat Pumps (GHP), in which heat exchange pipes are installed in the foundation element to transport the thermal energy from/to the ground. Due to their high energy efficiency and the use of renewable energies, energy piles are a viable option from the technical and environmental point of view to respond to the growing energy consumption for the air conditioning of buildings in Mexico. However, there are no design codes that bring together all the aspects that influence the performance and service requirements of this type of structure.

In this context, the main objective of this master's thesis is to carry out the geotechnical and structural design of an energy pile by using the *EPiles* numerical algorithm, implemented in this thesis in Matlab® language and based on load tranfer curves. The most relevant aspects of the behaviour of energy piles subjected to different load conditions are exposed, with emphasis on the effects of temperature.

In the main part of this work, the current state of knowledge about the thermo-mechanical response of energy piles is presented, as well as various analysis and design methods proposed in the international literature for this type of structures. In particular, the basic concepts for the application of load transfer curves in traditional systems and the changes required to consider the termal effects in energy piles are explained. Additionaly, the design recommendations are adapted to integrate the effect of temperature changes in the mechanical response of energy piles based on the Eurocodes to the Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones in force in Mexico (NTCDCC, 2017). Furthermore, the proposed load transfer model methodology is applied to the geotechnical and structural design of a practical-hypothetical case of an energy pile built at a particular site in Mexico's City.

Finally, conclusions and recommendations derived from the analyses carried out are given. As part of the recommendations, some relevant aspects are highlighted that should be further investigated to improve the numerical analysis of energy piles.

The *EPiles* program proposed in this work represents a useful tool for laying the foundations for energy piles design in Mexico.

## 1. INTRODUCCIÓN

La situación energética mundial ha llevado a la comunidad científica a desarrollar nuevas tecnologías que permitan abastecer la demanda actual y disminuir la contaminación resultante de este proceso. Una de las propuestas para enfrentar este problema es el uso de geoestructuras para aprovechar el gradiente térmico del suelo como fuente de energía para la climatización de espacios, denominadas como *estructuras termoactivas* (Laloui y Di Donna, 2011). Estas estructuras cumplen una función estructural, a la vez que permiten aprovechar la energía geotérmica superficial de acuerdo con los requerimientos de las edificaciones. Con este fin, se incorporan tuberías para el intercambio de calor entre la cimentación y el suelo permitiendo la extracción de calor durante el invierno y su posterior reinyección durante el verano. Su aplicación es particularmente favorable al reducir los costos de instalación y las emisiones de dióxido de carbono. Países como Austria, Suiza, Alemania, Reino Unido y China introdujeron el uso de elementos de calor para la calefacción o enfriamiento de edificios, siendo las pilas de energía los elementos termoactivos más utilizados en el mundo (Mimouni y Laloui, 2015).

A lo largo de los últimos 20 años, se han desarrollado diversos estudios de laboratorio y campo que han permitido caracterizar la respuesta de las pilas de energía sujetas a cargas térmicas y mecánicas, así como, determinar su comportamiento geotécnico y estructural (Rotta Loria, 2018). Sin embargo, no existen códigos de diseño que reúnan todos los aspectos que influyen en el comportamiento y requerimientos de servicio de este tipo de estructuras. Ante ello, se han realizado diversas pruebas de carga *in situ*, modelos en centrífuga y ensayos

a escala real que proveen información invaluable de la interacción suelo-estructura durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento (Laloui *et al.*, 2003, Bourne-Webb *et al.*, 2009, Amatya *et al.*, 2012, Akrouch *et al.*, 2014, Murphy *et al.*, 2015). Los resultados de estas pruebas indican que las cargas térmicas producen cambios significativos en la distribución de esfuerzos y deformaciones a lo largo de la pila (Brandl 2006, Laloui *et al.*, 2006, Bourne-Webb *et al.*, 2009).

En la práctica, se han desarrollado métodos analíticos y numéricos basados en datos experimentales para determinar el comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía, entre los que destacan aquéllos basados en curvas de transferencia de carga. Las curvas de transferencia de carga convencionales relacionan la resistencia de la pila y su desplazamiento a lo largo de diferentes puntos del elemento. Recientemente, han sido adaptadas al análisis térmico para representar el efecto de los ciclos de temperatura bajo diferentes condiciones de carga (Knellwolf et al., 2011, Plaseied 2012, Survatriyastuti et al., 2014, Chen y McCartney 2016). Su principal ventaja respecto a otros métodos (i. e., modelaciones numéricas basadas en el método de elementos finitos o diferencias finitas) es la eficiencia de cálculo y la flexibilidad para realizar evaluaciones paramétricas. Diversos autores (Knellwolf et al., 2011; Peron et al., 2011; Ouyang et al., 2011) han utilizado estas herramientas para estudiar el comportamiento de las pilas de energía, concluyendo que los esfuerzos térmicos influyen en el comportamiento mecánico de las pilas y, por lo tanto, deben tomarse en cuenta para su diseños estructural y geotécnico. Además, la expansión y contracción térmica sucesivas producen cambios en la interfaz pila-suelo que necesitan ser estudiados para determinar el impacto de los cambios de temperatura en la resistencia a la fricción.

El objetivo principal de esta investigación es realizar el diseño geotécnico y estructural de una pila de energía mediante la implementación de un algoritmo numérico basado en curvas de transferencia de carga, utilizando datos experimentales para su calibración. El programa implementado en esta tesis representa una herramienta para comprender la respuesta de pilas de energía sujetas a distintas combinaciones de carga y contribuir al diseño numérico de pilas de energía.

Esta tesis se organiza en cinco capítulos, incluyendo la introducción como Capítulo 1. En el Capítulo 2 se describen los elementos que conforman una cimentación a base de pilas de energía, así como, los parámetros geotécnicos y las características estructurales que influyen en su comportamiento. Posteriormente, se presenta una revisión bibliográfica de estudios experimentales realizados con pilas de energía como pruebas de carga *in situ* y modelos en centrífuga, detallando las condiciones de carga y tipo de suelo, además del procedimiento ejecutado. Enseguida, se analiza la respuesta de las pilas sujetas únicamente a carga térmica resaltando los efectos de la temperatura en el estado esfuerzo-deformación de este tipo de cimentación. Por último, se discute el comportamiento de la pila bajo carga termo-mecánica mediante dos casos de estudio: un elemento trabajando por fricción y el otro trabajando por punta.

En el Capítulo 3 se exponen diversos métodos de análisis y diseño que existen en la actualidad para estimar la respuesta axial de las pilas de energía. Al respecto, se presentan sus principales hipótesis y algunos ejemplos de casos de aplicación publicados en la literatura internacional. En este capítulo, se describe el modelo de transferencia de carga empleado en esta tesis para calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en pilas de energía. Este modelo toma en cuenta la respuesta de la cimentación bajo carga térmica y mecánica, y constituye un método práctico para identificar la influencia de la temperatura en la estructura bajo distintas condiciones de trabajo. En la parte final de este capítulo, se describen los criterios y procedimientos de cálculo para el diseño de una pila de energía con base en los Eurocódigos, el diseño de pilas convencionales con base en las consideraciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) de 2017. Tomando en cuenta lo anterior, se presenta una propuesta de adaptación de las recomendaciones para diseño de pilas de energía con base en los Eurocódigos a las NTCDCC-2017 de México. Al final, se explica cómo realizar el diseño estructural de una pila de energía.

En el Capítulo 4 se implementa el modelo de transferencia de carga propuesto en este trabajo para analizar el comportamiento de una pila de energía sujeta a distintas combinaciones de acciones. Para ello, se desarrolló un código en lenguaje Matlab® que permite acoplar la respuesta termo-mecánica de la estructura y optimiza la eficiencia de cálculo. Al inicio del capítulo se define el modelo geotécnico y las características estructurales de la pila de acuerdo con las condiciones estratigráficas de la Ciudad de México (zonificación geotécnica de las NTCDCC-2017). Enseguida, se describen de forma detallada las combinaciones de carga que se consideran en el análisis. Se efectúa el diseño geotécnico y estructural de la cimentación. Al final del Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, donde se destacan los efectos de la temperatura en el comportamiento de la pila de energía.

Finalmente, en el Capítulo 5 se dan conclusiones generales y recomendaciones derivadas de esta investigación. Asimismo, se sugieren futuras líneas de investigación para mejorar el conocimiento de las pilas de energía como elementos de cimentación con funcionamiento dual.

## 2. ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Consideraciones generales

Las Bombas de Calor Geotérmico (BCG) son máquinas que permiten transferir energía calorífica extraída del suelo a una edificación a través de un sistema cíclico. Estos sistemas forman parte de los usos directos de la energía geotérmica, específicamente de los recursos de baja entalpía. En los últimos años, las BCG tradicionales han sido sustituidas por estructuras termoactivas como las pilas de energía, ya que permiten reducir costos de construcción al ser elementos requeridos por razones estructurales. Las estructuras termoactivas aprovechan la energía geotérmica superficial de acuerdo con los requerimientos de las edificaciones. Para esto, se incorporan tuberías para el intercambio de calor en la cimentación que permiten transportar la energía térmica del/al suelo. Las pilas de energía desempeñan un papel muy importante en diversos países para suplir la creciente demanda de energía para acondicionamiento de espacios, entre ellos Alemania, Suiza, Inglaterra y Austria, aunque actualmente están ganando popularidad en Estados Unidos (Bodas *et al.*, 2013).

De acuerdo con el Congreso Geotérmico Mundial (*WGC*, por sus siglas en idioma inglés), la capacidad total instalada para la utilización directa de energía geotérmica en 2014 fue de 70,885 MWt<sup>1</sup>. Al finalizar el 2015, la capacidad total instalada de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) y Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica (ASET) en Europa fue de al menos 22'900 MWt (Antics *et al.*, 2016), posicionándose como una de las fuentes

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> El MWt es una unidad de potencia que mide la cantidad de energía liberada en forma térmica, en una central térmica.

de energía renovables más importantes en el continente. Por el contrario, en México, la energía geotérmica se utiliza casi en su totalidad para producir electricidad. Sus usos directos siguen en vías de desarrollo y están restringidos a las instalaciones de baño y de nado con fines recreativos y algunos usos terapéuticos (Lund y Boyd, 2016). Actualmente, existe un creciente consumo de energía para la climatización de edificios, ya que en algunas regiones del país predomina el clima cálido y al norte generalmente se presentan temperaturas bajas. Ante ello, las pilas de energía se vislumbran como una alternativa para satisfacer estos requerimientos, siendo una opción sustentable en el ámbito técnico y ecológico.

### 2.2. ¿Qué son las pilas de energía?

Las pilas de energía son un tipo especial de Bombas de Calor Geotérmico (BCG) de sistema cerrado, en las que se instalan tuberías de intercambio de calor en el elemento de cimentación para extraer o inyectar energía térmica del/al suelo con el objetivo de acondicionar espacios y abastecer de agua caliente doméstica (Abuel Naga *et al.*, 2015). Partiendo de una fuente de energía renovable y aprovechando las propiedades térmicas del concreto, permiten la extracción de calor del suelo para que funcione como sistema de calefacción durante el invierno y la expulsión del exceso de calor de los edificios durante el verano (Figura 2.1). En consecuencia, los edificios pueden calentarse o enfriarse a un costo mínimo. La energía eléctrica de entrada para operar el sistema completo varía entre 20-30 % de la energía total de salida.



Figura 2.1. Esquema de operación del sistema de pilas de energía: (a) extracción de energía y (b) almacenamiento de energía (adaptado de Suryatriyastuti *et al.*, 2012)

Entre los principales beneficios que ofrecen las pilas de energía se encuentran: la reducción de costos respecto a los sistemas de climatización tradicionales, la factibilidad de instalación en la mayoría de las condiciones geológicas y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero ya que utilizan una fuente de energía limpia (De Moel *et al.*, 2010). Estas ventajas permiten que las pilas de energía se consoliden como una opción viable ante la problemática actual del ámbito energético. Sin embargo, existe una falta de conocimiento en cuanto a los efectos térmicos en el comportamiento mecánico de la cimentación. Por años, el dimensionamiento de las pilas de energía se ha basado en consideraciones empíricas (Boënnec, 2009). Un procedimiento clásico para reducir la intertidumbre de diseño, es incrementar los valores típicos de los factores de seguridad empleados en cimentaciones con pilas, lo cual tiene grandes consecuencias en el costo de la construcción.

El sistema de pilas de energía consta de tres partes: a) circuito primario, b) bomba de calor y c) circuito secundario (Figura 2.2).



Figura 2.2. Componentes de una bomba de calor geotérmico (BCG) para el caso de pilas de energía (adaptado de LAFARGE, 2013)

El circuito primario contiene tuberías instaladas dentro de los elementos de concreto en un sistema cerrado a través de las cuales es bombeado un fluido conductor de calor que permite el intercambio de energía entre la edificación y el suelo. El fluido conductor de calor depende de la temperatura mínima de diseño en el circuito primario. Puede ser agua, mezclas de agua con anticongelante para temperaturas más bajas o soluciones salinas. Las soluciones con anticongelante han demostrado ser las más apropiadas ya que pueden contener aditivos para prevenir la corrosión en las válvulas y la bomba de calor (Brandl, 2013). Ya que el circuito primario se une al refuerzo estructural, representa una gran ventaja respecto a otros sistemas de BCG al reducir costo de perforación y tiempo durante la construcción.

El circuito secundario es una red cerrada de tuberías de calefacción o refrigeración que son colocadas en los pisos y paredes de la edificación. Ambos circuitos se conectan a través de una bomba de calor que se encarga de incrementar la temperatura, generalmente de 10-15 °C hasta 25-35 °C. Para este proceso se requiere el suministro de una pequeña cantidad de energía eléctrica que eleva la temperatura extraída del suelo a un nivel aprovechable. (Brandl, 2006).

Como se muestra en la Figura 2.3, las configuraciones más comunes para la tubería de circuito primario son: U simples, dobles, triples o en W, siendo estas últimas las que pueden disipar más calor. Sin embargo, una disposición tipo U ofrece mejor trabajabilidad y eficiencia económica. Las tuberías en U están hechas normalmente de polietileno de alta densidad o polietileno reticulado. Estas tuberías usualmente son de <sup>3</sup>/<sub>4</sub> o 1 pulgada (27 o 34 mm) de diámetro (Ryozo, 2006). Los arreglos dobles o triples son empleados cuando se busca mejorar la eficiencia de la transferencia de calor al incrementar el número de tuberías, no obstante, es necesario considerar la instalación de separadores para evitar las interacciones térmicas entre ellos (Soga y Rui, 2016). En consecuencia, actualmente existe un interés en estudiar el rendimiento de las tuberías helicoidales para sustituir este tipo de arreglos (Park *et al.*, 2015).



Figura 2.3. Configuraciones más comunes para tuberías de conducción (adaptado de Gao *et al.*, 2008)

Existen dos tipos de sistema de operación para el uso de energía geotérmica en pilas de energía: de inyección/extracción pura o almacenamiento de calor estacional. Para la inyección/extracción pura, el flujo de calor es unidireccional (extracción durante el invierno o inyección en verano), permitiendo que el suelo regrese a su condición térmica inicial cuando el acondicionamiento no es requerido (López-Acosta *et al.*, 2017). En los sistemas estacionales se utiliza la inercia térmica del suelo para conservar la energía recibida y

utilizarla posteriormente. En consecuencia, estos sistemas producen un equilibrio térmico durante un ciclo completo de calefacción y enfriamiento.

La eficiencia de las pilas de energía depende de diferentes parámetros relacionados con las condiciones del suelo y las características estructurales de la cimentación. Uno de los principales factores que se deben considerar es la temperatura del subsuelo. En él, pueden distinguirse tres zonas de acuerdo con su temperatura: heterotérmica, neutral y homotérmica (Suryatriyastuti *et al.*, 2012). La zona heterotérmica se extiende hasta aproximadamente 10 m de profundidad, y en ella la temperatura del suelo es influenciada por la temperatura del ambiente y la radiación solar. Lo anterior produce una fluctuación sinusoidal de la temperatura en función del tiempo, siendo la zona más crítica y que debe tomarse en cuenta para el diseño de la cimentación. La zona neutral comprende entre los 10-50 m de profundidad. En esta zona la temperatura del suelo es constante y aproximadamente igual a la temperatura media anual, lo cual permite que sea una fuente de calor estable para cubrir el suministro de energía al edificio. Por otro lado, la zona homotérmica se encuentra al pasar los 50 m de profundidad y ya no es afectada por el flujo térmico externo. En esta zona se desarrolla la energía geotérmica profunda. La variación de la temperatura es función de la profundidad, incrementando a una tasa aproximada de 3°C cada 100 m (Riederer *et al.*, 2007)

Otros parámetros geotécnicos que influyen en el funcionamiento de las pilas de energía son: la capacidad calorífica  $c_s$  y la conductividad térmica  $\lambda$ . La capacidad calorífica del suelo se define como la energía necesaria para aumentar su temperatura en un grado Celsius, esta propiedad depende de la humedad, porosidad y composición del suelo (Wierenga *et al.*, 1969). Un suelo húmedo presenta una capacidad calorífica más alta que los suelos secos. Sus valores varían por lo general entre 1.5-2.5 MJm<sup>-3</sup>K<sup>-1</sup> (Alnefaie *et al.*, 2013). La conductividad térmica  $\lambda$  es una propiedad natural del suelo y mide la capacidad del material de conducir calor. Su valor depende de varios factores como el tipo de suelo, composición, estructura, densidad aparente, porosidad, contenido de humedad y temperatura (Li *et al.*, 2019). En condiciones de suelo seco los valores típicos para la conductividad térmica varían entre 0.4 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> (grava y arena) y 0.5 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> (arcilla y limo). Por otra parte, en suelos saturados sus valores llegan hasta 5 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> para arenas y 2.3 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>en arcillas (Dalla Santa *et al.*, 2020).

Las características estructurales de la pila también tienen una función importante en el sistema de intercambio de calor. En general, se diseñan las pilas con base en los requisitos estructurales y con base en ello se calcula la cantidad de energía geotérmica que puede ser provista por la cimentación. La longitud de las pilas de energía varía entre 7 a 50 m y su sección transversal de 0.3 a 1.5 m. Existen dos suposiciones principales para calcular la capacidad de energía que puede obtenerse de una pila (LAFARGE, 2013):

- Pilas de cimentación con diámetro de D = 0.3-0.5 m: 40-60 W/m longitud pila.
- Pilas de cimentación con diámetro de D > 0.6 m: 35 W/m<sup>2</sup> superficie pila.

### 2.3. Estudios experimentales en pilas de energía

En el diseño de pilas de energía es necesario analizar el efecto de la temperatura en la respuesta mecánica de la estructura. Para evaluarlo, se han realizado diversos estudios que incluyen: pruebas de carga *in situ*, modelos en centrífuga y modelos a escala.

Las pruebas a escala real *in situ* son de gran importancia ya que brindan una visión completa de la interacción suelo-estructura durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Durante estos ciclos, el concreto se expande y contrae produciendo deformaciones adicionales al comportamiento mecánico de la estructura. Para monitorear las deformaciones y la temperatura a lo largo de la pila durante la prueba *in situ*, la estructura es equipada con dos tipos de sensores: fibras ópticas y extensómetros. Las fibras ópticas proporcionan datos más precisos de las deformaciones, pero requieren más logística para operarlas (una unidad de lectura y una computadora para operarla) mientras que los extensómetros brindan mediciones confiables de temperatura y deformaciones con una pequeña y simple unidad de lectura (Laloui y Di Donna, 2013).

Por otra parte, los modelos a escala en centrífuga permiten complementar la experiencia obtenida a partir de los métodos empíricos. Estos modelos se basan en el concepto de similitud geométrica, el cual supone que un prototipo a escala real tendrá el mismo estado de esfuerzo que un modelo a escala reducida que es N veces menor, si se somete a una aceleración centrípeta igual a N veces la aceleración de la gravedad de la Tierra (Ko, 1988; Taylor 1995). Los modelos en centrífuga simulan el comportamiento de las pilas de energía bajo condiciones de laboratorio controladas, siendo una aproximación bastante útil para evaluar diferentes configuraciones de análisis. A continuación, se presentan algunos estudios experimentales realizados en pilas de energía que han sido publicados en la literatura internacional y cuyos datos fueron utilizados en la calibración del modelo de transferencia de carga empleado en esta tesis.

## 2.3.1. Pruebas de carga *in situ*

## • Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza

La prueba se efectuó en una pila de energía de concreto de 25.8 m de longitud y 0.88 m de diámetro construida en un edificio de cuatro pisos en el Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) (Laloui *et al.*, 2006). Se instalaron tubos de polietileno en la estructura con una configuración tipo U simple. Se colocaron extensómetros para medir las deformaciones verticales y radiales, sensores de temperatura y una celda de carga para obtener la carga en el fondo de la pila.

La carga mecánica aplicada fue producida por el peso del edificio y corresponde a las siete etapas de construcción realizadas. El valor de la carga máxima aplicada en la cabeza de la pila fue de 1000 kN. Al finalizar cada etapa constructiva (Figura 2.4), se aplicaron ciclos térmicos controlados por dispositivos reguladores de temperatura que se encontraban

instalados en los tubos de polietileno. Para medir la carga térmica de forma independiente a la carga mecánica, se realizó una prueba antes de la construcción del edificio (*T1*) en la que se consideró que la pila no tenía ninguna restricción en la cabeza y se aplicó un incremento de temperatura  $\Delta T$ = 22°C. Para las etapas posteriores, el incremento aplicado fue de 15°C aproximadamente.



Figura 2.4. Valores de la tempera media de la pila durante las siete etapas de construcción (adaptado de Laloui *et al.*, 2003)

La Figura 2.5a muestra los desplazamientos verticales medidos en la cabeza de la pila durante la primer etapa constructiva (*T1*), en la que se impuso un ciclo térmico de 12 días de calentamiento y 16 de enfriamiento. Se observa que la pila se expandió debido al incremento de temperatura y se contrajo durante la fase de enfriamiento. Dichos movimientos se generaron sin restricciones en la parte superior de la estructura. Por otra parte, la Figura 2.5b presenta los esfuerzos verticales obtenidos durante la séptima etapa de construcción (T7). Los resultados indican que la carga mecánica generó esfuerzos mayores en la parte superior de la pila y se redujeron con la profundidad, mientras que los efectos térmicos tuvieron un valor mayor en la zona inferior. Al combinar la acción de estas cargas en la estructura, la magnitud de los esfuerzos aumentó aproximadamente al doble respecto al análisis realizado sin la aplicación del ciclo térmico. De acuerdo con Laloui *et al.* (2009) los cambios de temperatura de 1°C producen un incremento de carga del orden de 100 kN.



Figura 2.5. (a) Movimiento de la pila durante ciclo de calentamiento-enfriamiento; (b) Esfuerzos verticales termo-mecánicos en la pila (adaptado de Laloui *et al.*, 2006)

#### • Lambeth College, Reino Unido

Bourne- Webb *et al.* (2009) realizaron una prueba de carga en una pila localizada en un edificio en construcción del Lambeth College (Londres, Reino Unido). La pila de 23 m de longitud y 0.55 m de diámetro se instaló en la formación arcillosa característica de Londres. La prueba consistió en la aplicación de una carga mecánica en la cabeza mediante un marco de carga y ciclos térmicos de enfriamiento-calentamiento de acuerdo con las siguientes etapas:

- Aplicación de carga mecánica con un valor de 1800 kN, seguida de la descarga total del elemento.
- Aplicación de recarga de 1200 kN.
- Fase de enfriamiento con un cambio de temperatura de -19 °C y manteniendo carga mecánica constante de 1200 kN.
- Calentamiento de la pila con un incremento de temperatura de 10 °C, bajo carga mecánica constante.
- Aplicación de carga final de 3600 kN.

La Figura 2.6 presenta los perfiles de resistencia a la fricción movilizada y carga axial al finalizar la aplicación de los ciclos térmicos en la pila. Durante la fase de enfriamiento, se observó un incremento de la resistencia a la fricción en la parte superior del elemento de 60 kPa aproximadamente. Además, los resultados indican que se produjo una reducción de la carga axial conforme aumenta la profundidad y que la pila experimentó una contracción que generó fuerzas de tensión en la zona inferior de la cimentación. En el caso del calentamiento, se desarrolló fricción negativa arriba de los 6 m de profundidad e incrementó la fricción positiva en la parte inferior. En cuanto a las cargas axiales, existió un considerable aumento en las fuerzas de compresión que coincidió con la expansión de la pila.



Figura 2.6. Respuesta observada en una pila de energía en Lambeth College: (a) Calentamiento (b) Enfriamiento (adaptado de Bourne-Webb *et al.*, 2013)

#### • Grupo de pilas en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza

Mimouni y Laloui (2015) realizaron una investigación en el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Lausana (Suiza) para medir la respuesta entre las interacciones que pueden desarrollarse en las pilas de energía. Se instaló un grupo de cuatro pilas con un diámetro de 0.9 m y 28 m de longitud, debajo de un tanque de retención de agua. Se efectuaron ensayos en las pilas antes y después de la construcción del tanque, de forma individual y grupal.

El objetivo de la prueba individual antes de la construcción del tanque era obtener información del impacto de las condiciones de frontera y la respuesta del suelo en el comportamiento de la pila. Se aplicó un incremento de temperatura de 3.6 °C que resultó en una carga axial térmica de 560 kN a 4 m debajo de la cabeza de la pila. Después de la construcción del tanque, las pilas de sometieron a 6 días de calentamiento con incrementos de temperatura de 6.5 a 10 °C y luego se dejaban enfriar para regresar a su temperatura inicial. Finalmente, para evaluar el calentamiento global de la estructura después de la construcción del tanque, se aplicaron incrementos de temperatura simultáneos de 7.4 a 9.1 °C.

En la Figura 2.7 se presentan los resultados de las pruebas individuales realizadas sobre las cuatro pilas durante el ciclo de calentamiento. La distribución de la carga térmica indica que la restricción del tanque bloqueó las deformaciones en los primeros 20 m de profundidad, ocasionando un incremento de carga respecto a las mediciones antes de la construcción entre 983 kN y 1543 kN. Por lo tanto, las deformaciones térmicas mostraron valores de expansión mayores en la parte inferior donde no fueron afectadas por el tanque y menores en la parte superior.



Figura 2.7. Perfiles de (a) Carga térmica máxima (b) Deformación térmica máxima durante pruebas individuales (adaptado de Mimouni y Laloui, 2015)

Como comparativa a la prueba individual (Figura 2.8), se observó que al incrementar la temperatura de las cuatro pilas de forma simultánea, la carga térmica interna disminuyó a valores entre 776 kN y 1100 kN. Por otra parte, las máximas deformaciones se presentan en la zona inferior de las pilas.



Figura 2.8. Perfiles de (a) Carga térmica máxima (b) Deformación térmica máxima durante prueba de grupo (adaptado de Mimouni y Laloui, 2015)

#### 2.3.2. Modelos en centrífuga

#### • Universidad de Colorado en Boulder

Stewart y McCartney (2014) construyeron un modelo a escala reducida de una pila de punta con 50.8 mm de diámetro y 533 mm de longitud, equipada con tuberías en configuración Utriple y sujeta a una acelaración centrípeta de 24g. El modelo corresponde a un prototipo real de 1.2 m de diámetro y 12.8 m de longitud. La parte inferior del elemento se encontraba restringida ya que descansaba sobre una capa de suelo rígida y en la parte superior se permitió la expansión libre bajo la aplicación de una carga constante. Se instalaron extensómetros, termopares y transductores de desplazamiento en la cabeza de la pila, así como en distintas zonas del suelo para evaluar el comportamiento de la interacción suelo-estructura de la cimentación (Figura 2.9).



Figura 2.9. Modelo a escala de pila de energía e instrumentación (adaptado de Stewart y McCartney, 2014)

Una vez equipado el prototipo, se aplicó una carga de 443 kN para representar la carga constante del edificio. A continuación, se aplicaron las cargas de temperatura de la siguiente forma: 1) calentamiento de la pila de 20 °C a 39 °C, 2) etapa de enfriamiento con un cambio de temperatura de -10 °C y 3) aplicación de cuatro ciclos de calentamiento con un incremento por ciclo de 9 °C. La Figura 2.10a presenta los resultados de los esfuerzos axiales térmicos y se observó que los valores de mayor magnitud se encontraban en la base de la cimentación, debido a las restricciones del modelo en esa zona. Las deformaciones máximas se registraron en la cabeza de la pila donde podía expandirse libremente y disminuían en la parte inferior.

Por otra parte, durante el primer ciclo de calentamiento la cabeza de la pila tuvo un desplazamiento térmico hacia arriba de 1.4 mm. Las etapas de enfriamiento indicaron que la cimentación se contrajo pero no regresó a su posición original, ya que el modelo no retornaba a la temperatura ambiente. En los ciclos de calentamiento subsecuentes, la pila experimentó una expansión menor al ciclo previo con un valor promedio de 1.26 mm durante cada etapa (Figura 2.10b).



Figura 2.10. Resultados de prueba: a) Esfuerzos térmicos verticales b) Desplazamiento térmico en la cabeza durante ciclos de calentamiento-enfriamiento (adaptado de Stewart y McCartney, 2014)

#### • Universidad de California en San Diego

Goode *et al.* (2015) llevaron a cabo un estudio en el que diseñaron dos modelos a escala en centrífuga con un diámetro de 63.5 mm, para analizar el efecto de las condiciones de frontera en la cabeza y al pie de la cimentación. Para el primer modelo se consideró una longitud de 342.9 mm y para el segundo 533.4 mm, sometidos a una aceleración centrípeta de 24g. Representan una pila de energía cuyo diámetro es de 1.5 m, con 8.2 m y 12.7 m de longitud respectivamente. Se llevaron a cabo seis pruebas en una arena mal graduada de Nevada (SP) y cuatro en un limo de baja compresibilidad (ML).

El ensayo realizado en el modelo con la longitud menor se configuró para el caso de una pila semi-flotante. Se aplicó una carga axial inicial de 360 kN y luego se incrementó la temperatura de 0°C, 7°C, 12°C hasta 18°C bajo carga controlada, para que la cimentación fuera libre de moverse en la parte superior. Una vez que se mantuvo una temperatura constante por aproximadamente 30 min, se aplicó una carga de 2400 kN y se descargó totalmente el elemento. Para el otro modelo se consideró una pila de punta, en el que se realizaron dos pruebas con la arena de Nevada. Uno de los ensayos se ejecutó con carga controlada de 1200 kN y el otro con una precarga de 1000 kN bajo deformación controlada. Finalmente, se realizó una prueba en el limo que consistió en calentar la cimentación bajo carga controlada en diferentes etapas.

Con base en los resultados obtenidos, la restricción impuesta por el fondo rígido en la pila de punta produce mayores esfuerzos axiales en este caso que para la condición semi-flotante. La Figura 2.11a muestra que para el modelo calentado bajo deformación controlada (prueba 9), se presenta un aumento en el esfuerzo en la parte superior del elemento respecto a la prueba con carga controlada (prueba 8), demostrando que las condiciones de frontera impuestas a la pila influirán directamente en la distribución de esfuerzos a lo largo de la cimentación. Por otro lado, en la Figura 2.11b se observa que los esfuerzos son mayores para



el modelo instalado en limo que en el caso de la arena de Nevada. Dicho comportamiento se asocia al incremento de esfuerzos radiales durante la compactación inicial de la prueba.



Las curvas carga-desplazamiento obtenidas para pilas semi-flotantes instaladas en arena presentan un comportamiento similar al incrementar la temperatura, lo cual representa un efecto despreciable de este parámetro en la resistencia de la cimentación. Sin embargo, para los modelos en limos compactados el calentamiento de las pilas produce un incremento en la resistencia última (Figura 2.12). El comportamiento entre ambos ensayos difiere principalmente debido a la baja resistencia radial que proporciona la arena a diferencia del limo compactado.



Figura 2.12. Curva carga-desplazamiento de una pila de energía semi-flotante instalada en limo de baja compresibilidad, ML (adaptado de Goode *et al.*, 2015)

#### 2.4. Comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía

Las pilas de energía a diferencia de las cimentaciones clásicas están sujetas a cargas termomecánicas que producen esfuerzos y deformaciones adicionales a lo largo de la cimentación, lo cual depende principalmente de sus condiciones de frontera y el tipo de suelo circundante. Esta condición de cargas acopladas destaca la necesidad de tener un claro entendimiento de los efectos de la temperatura en el comportamiento mecánico de la interacción pila-suelo. (Abuel-Naga *et al.*, 2015).

En condiciones de servicio, la cimentación es calentada o enfriada debido a la circulación del fluido intercambiador de calor entre las tuberías instaladas en el concreto. La temperatura generalmente varía entre +4 °C (para evitar el congelamiento de la pila y el suelo) y +30 °C (Peron *et al.*, 2011). Sin embargo, en algunas situaciones (mala operación o incluso recarga térmica externa de paneles solares), un aumento de temperatura arriba de +40 °C o +50°C es concebible (SIA 2005; Silvani *et al.*, 2008). En consecuencia, el funcionamiento básico de la pila consiste en la expansión y contracción del elemento respecto a estas variaciones de temperatura. No obstante, la respuesta de la cimentación a las diferentes combinaciones de cargas será única en cada caso.

#### 2.4.1. Respuesta ante cargas térmicas

#### 2.4.1.1. Deformación térmicamente inducida

Si la pila no se encuentra restringida, el cambio de temperatura  $\Delta T$  (°C) produce una deformación térmica libre proporcional a su coeficiente de dilatación térmica  $\alpha$  (µ $\epsilon$ /°C):

$$\varepsilon_{T-Libre} = \alpha \Delta T$$
 (2.1)

Al incrementar la temperatura se generan deformaciones expansivas y durante la etapa de enfriamiento contractivas. Lo anterior da como resultado cambios en la geometría de la pila (Figura 2.13a). Por el contrario, si se limita el libre movimiento del elemento (Figura 2.13b) se observa una deformación unitaria ( $\varepsilon_{T-o}$ ) menor a la libre. A la diferencia entre la deformación unitaria libre y la observada se denomina deformación restringida ( $\varepsilon_{T-Rstr} = \varepsilon_{T-Libre} - \varepsilon_{T-o}$ ). La restricción de la deformación ocasiona un cambio en el esfuerzo axial del elemento, generando perfiles a compresión al calentar la pila y tensión durante el enfriamiento.

Una forma de evaluar los esfuerzos adicionales generados en la pila es calcular su grado de libertad (*n*), el cual está definido por la relación entre las deformaciones axiales libres y observadas,  $\varepsilon_{T-Libre}$  y  $\varepsilon_{T-o}$  (Bochon, 1992):

$$n = \frac{\varepsilon_{T-o}}{\varepsilon_{T-Libre}}$$
(2.2)

Cuando la pila está totalmente restringida, este valor es teóricamente cero y cuando es completamente libre de moverse el grado de libertad es igual a uno. Los esfuerzos térmicos inducidos se comportan de forma opuesta al grado de libertad. Ya que, al aumentar el nivel

de restricción, las deformaciones debidas al cambio de temperatura serán menores ( $\varepsilon_{T-o}$ ) y el valor del grado de libertad disminuye. Si se supone un comportamiento elástico lineal de la pila, los esfuerzos causados por los cambios de temperatura ( $\sigma_T$ ) pueden determinarse como:

$$\sigma_T = E \cdot \varepsilon_{T-Rstr} = (n-1)\alpha \cdot \Delta T \cdot E \tag{2.3}$$

donde E es el módulo de elasticidad de la pila.



Figura 2.13. Respuesta térmica durante etapa de calentamiento: (a) Cuerpo libre (b) Cuerpo restringido (adaptado de Bourne-Webb et al., 2013)

#### 2.4.1.2.Pilas de energía sin carga mecánica en la cabeza

Para analizar el efecto del suelo y las condiciones de frontera en un elemento sin carga mecánica en la cabeza, se hacen las siguientes consideraciones: el suelo tiene resistencia uniforme a lo largo del eje de la pila, la pila es linealmente elástica, los cambios de temperatura son uniformes y el área transversal del elemento es constante. Además, los esfuerzos y deformaciones a compresión, así como la resistencia a la fricción actuando hacia arriba se consideran positivos.

La Figura 2.14 muestra los perfiles de carga térmica axial y resistencia a la fricción desarrollados en una pila de energía al incrementar la temperatura. Como consecuencia de la ausencia de carga mecánica en la cabeza, la pila se dilata produciendo un desplazamiento relativo vertical (en las zonas que no se encuentran restringidas por el suelo) y cargas axiales de compresión. En este caso, donde los extremos son libres de moverse, las deformaciones observadas resultan menores en la mitad de la profundidad del elemento y mayores en los extremos. El desplazamiento relativo del pilote con respecto al movimiento del suelo genera que la mitad superior del elemento se encuentre sujeta al desarrollo de fricción negativa, mientras que en la zona inferior se presenta fricción positiva. Los resultados de estudios previos indican que el incremento de temperatura mejora la resistencia última a la fricción

movilizada entre pilas de energía y arcilla (Di Donna *et al.*, 2016) y arena (Wang *et al.*, 2015). Sin embargo, usando un estudio paramétrico, Fuentes *et al.* (2016) mostró que a corto plazo la resistencia a la fricción de las pilas de energía, en bajas permeabilidades y arcillas de baja compresibilidad, puede disminuir sustancialmente debido al exceso de presión de poro y la baja presión de contacto efectiva en la interfaz.



Figura 2.14. Efecto de las condiciones de frontera en la respuesta térmica durante la etapa de calentamiento: (a) sin restricciones en los entremos (b) con restricciones en los extremos. (adaptado de Bourne-Webb *et al.*, 2013)

Como se mencionó anteriormente, las restricciones principales a las deformaciones térmicas libres son: el suelo alrededor de la pila, la presencia de una capa de suelo rígida en la punta y/o la superestructura. Así, la cimentación está sujeta a esfuerzos térmicos adicionales que se distribuirán de acuerdo con la restricción dominante. Cuando existen restricciones parciales en la cabeza y punta, la carga axial crece respecto al caso con deformaciones libres. Aunado a ello, la variación de la resistencia a la fricción movilizada disminuye debido a que el movimiento relativo de la interfaz pila-suelo está contenido.

#### 2.4.2. Respuesta ante cargas termo-mecánicas

En esta sección se presentan dos esquemas que permiten caracterizar la respuesta de las pilas de energía ante la influencia de las cargas mecánicas y térmicas en un suelo homogéneo. Estos perfiles sirven como referencia para los casos que involucran condiciones más complejas, como la heterogeneidad del suelo y la naturaleza no lineal en la interacción suelo-estructura.

La forma de trabajo de la cimentación es muy importante para evaluar las acciones termomecánicas durante el calentamiento y el enfriamiento. En la práctica, las pilas se pueden clasificar de acuerdo con su resistencia a cargas axiales en tres tipos: por punta, por fuste (flotantes) y semi-flotantes. Las primeras se caracterizan por obtener su capacidad de carga fundamentalmente del estrato resistente ubicado cerca de la punta, las pilas flotantes transmiten su carga al terreno por rozamiento lateral a través del fuste y las semi-flotantes son aquellas en las que la estructura resiste simultáneamente por punta y por adherencia.

En la Figura 2.15 se muestran los esfuerzos y deformaciones debidos a cargas mecánicas (línea punteada) y termo-mecánicas (línea continua) en una pila trabajando por fricción. Al incrementar la temperatura, el elemento se expande y la parte superior se desplaza hacia arriba, mientras que la zona inferior se traslada en dirección opuesta. En consecuencia, las deformaciones ( $\varepsilon_{T-o}$ ) son mayores en los extremos de la pila y menores a la mitad, donde el suelo restringe su movimiento. Por otra parte, la magnitud de la fricción cerca de la punta aumenta, ya que lleva la misma dirección que la fricción generada por la carga mecánica. En la parte superior de la pila se desarrolla fricción negativa por calentamiento y su valor se reduce a medida que el elemento se desplaza hacia arriba. Al enfriar la pila, ocurre lo contrario, los esfuerzos térmicos ( $\sigma$ ) se reducen y una parte del elemento tiende a generar tensión. Es importante verificar este tipo de respuesta durante el diseño, ya que las estructuras de concreto no son hábiles para soportar tensión y debe considerarse un mínimo de acero de refuerzo longitudinal. En términos generales, los esfuerzos de tensión no son tan grandes como para sobrepasar los de compresión. Así que, aparte de los inconvenientes relacionados con los desplazamientos, el aspecto más restrictivo que determina la carga máxima que la pila es capaz de soportar es representada por su capacidad geotécnica (Di Donna et al., 2013).



Figura 2.15. Comportamiento termo-mecánico en una pila de fricción: (a) Calentamiento (b) Enfriamiento (adaptado de Soga y Rui, 2016)

En la Figura 2.16 se muestran los esfuerzos y deformaciones debidos a cargas mecánicas (línea punteada) y termo-mecánicas (línea continua) en una pila trabajando por punta. Al calentar la pila, el elemento tiende a desplazarse hacia arriba ya que el estrato de suelo rígido

ubicado al pie de la cimentación limita la expansión en esta zona. Las deformaciones térmicamente inducidas serán mayores en la cabeza de la pila ( $\varepsilon_{T-o}$ ). No obstante, debido a que la expansión de la zona superior contrarresta los desplazamientos mecánicos, las deformaciones totales ( $\varepsilon$ ) resultan menores en el caso termo-mecánico respecto al perfil generado sólo por carga mecánica. En general, los esfuerzos térmicos crecen con la profundidad ( $\sigma$ ). La superestructura en la parte superior de la pila actúa como una restricción contra la dilatación térmica de la cimentación, por lo tanto, se traduce en un aumento de los esfuerzos axiales de compresión en la cabeza de la pila (Sutman, 2016). El estrato de suelo rígido ubicado en la punta también produce esfuerzos adicionales en la zona inferior del elemento. Durante la etapa de enfriamiento, las deformaciones totales  $(\varepsilon)$  resultan mayores respecto al perfil generado al calentar la pila. En este caso, el elemento se contrae y la magnitud de los desplazamientos térmicos cerca de la cabeza aumenta, ya que llevan la misma dirección que los desplazamientos generados por la carga mecánica. Los perfiles muestran que al disminuir la temperatura los esfuerzos térmicos ( $\sigma$ ) se reducen con la profundidad. Es posible que las restricciones en la punta tengan menor influencia en la contracción que en la expansión por calentamiento. (Wang et al., 2016).



Figura 2.16. Comportamiento termo-mecánico en una pila de punta: (a) Calentamiento (b) Enfriamiento (adaptado de Soga y Rui, 2016)

## 3. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO PARA PILAS DE ENERGÍA

Se han realizado numerosas investigaciones experimentales y teóricas para evaluar las características geotécnicas de las pilas como elementos de cimentación debido a su extensa aplicación en la infraestructura civil. Sin embargo, para el caso de las pilas de energía, no existen códigos de diseño que permitan comprender todos los aspectos que tienen influencia en su comportamiento o si cumplen los requerimientos de servicio. Por lo tanto, existe una clara necesidad de desarrollar una normativa que incluya desde la selección de la geometría hasta la revisión por estados límite.

Si bien el método más confiable para determinar la respuesta de las pilas se basa en los resultados obtenidos de las pruebas de carga en la pila, este método puede ser costoso y lento (Armaleh y Desai, 1987). Como alternativa, se recurre a diferentes modelos de análisis desarrollados para evaluar el comportamiento termo-mecánico de las pilas de energía. Estos modelos se pueden clasificar en: (1) reglas empíricas (2) modelos de transferencia de carga y (3) modelos numéricos con elementos finitos.

Los métodos de transferencia de carga son ampliamente utilizados en la práctica de la ingeniería geotécnica para estimar la respuesta axial de pilas aisladas (Bourne-Webb *et al.*, 2016). Su requisito principal es incorporar la función t-z apropiada para medir la resistencia a la fricción de cada elemento y el desplazamiento relativo pila-suelo. Existe un gran número de curvas t-z con diferentes grados de complejidad y parámetros del suelo, entre ellas se encuentran los modelos establecidos por Coyle y Reese (1966), Seed & Reese (1957), Frank & Zhao (1982), y el modelo hiperbólico de Hirayama (1990).
## 3.1. Métodos de análisis

#### 3.1.1. Reglas empíricas

En muchos casos, el proceso de dimensionamiento de pilas de intercambiadores de calor se basa en consideraciones empíricas utilizando métodos conservadores para estar del lado de la seguridad (Boënnec, 1992; Johnston *et al.*, 2011). Este enfoque toma en cuenta dos suposiciones generales:

- I. Si la pila se encuentra totalmente restringida, se puede estimar la variación de la carga axial en función de la temperatura.
- II. La máxima deformación se calcula suponiendo que el elemento actúa como un cuerpo libre.

El uso de estas aproximaciones para evaluar la respuesta termo-mecánica de las pilas proporciona una herramienta práctica que permite anticipar las condiciones en las cuales se encuentra la pila y a partir de ello formular una metodología más elaborada que incluya todos los parámetros del caso de estudio. Ya que, las reglas empíricas no son capaces de capturar fenómenos más complejos como el caso de suelos expansivos o cambios en la geometría de la pila.

#### 3.1.2. Curvas de transferencia de carga

Knellwolf *et al.* (2011) adaptaron el método t-z para pilas convencionales al análisis térmico, ilustrando como el calentamiento y enfriamiento afecta a diferentes tipos de pilas. El modelo fue validado con base en los resultados de las pruebas de campo de EPFL (Laloui *et al.*, 2006) y Lambeth College (Bourne-Webb *et al.*, 2009). McCartney y Rosenberg (2011) definieron las curvas t-z empleando funciones hiperbólicas para obtener una representación preliminar de los cambios en la resistencia a la fricción con el calentamiento y posteriormente realizaron una prueba centrífuga para comprobar los resultados. Otro estudio que utiliza funciones hiperbólicas para las curvas de transferencia de carga fue propuesto por Ouyang *et al.* (2011), en el cual ajustaron la solución elástica continua para modelar la interacción pila-suelo durante el proceso de intercambio de calor. En este caso, para reproducir la descarga térmica debida a los ciclos de temperatura, modificaron la rigidez inicial de la curva t-z. Pasten y Santamarina (2014) variaron el método de transferencia de carga unidimensional (Coyle y Reese 1966; Poulos y Davis 1980) para incluir la respuesta a largo plazo de una pila bajo carga estática y ciclos de temperatura. Sin embargo, el modelo no ha sido calibrado con datos experimentales.

## 3.1.2.1. Procedimiento de cálculo

El método de transferencia de carga empleado en esta tesis está basado en el modelo desarrollado por Chen y McCartney (2016) para calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en pilas de energía. Este modelo fue propuesto para tomar en cuenta la

respuesta de la cimentación sujeta tanto a carga mecánica como térmica y considera lo siguiente:

- Sólo se analizan desplazamientos axiales los cuales son calculados mediante un esquema unidimensional de diferencias finitas. Los desplazamientos radiales y sus interacciones mecánicas con el suelo son despreciados debido a que su valor se considera muy bajo con relación al efecto de los desplazamientos axiales.
- Las propiedades del suelo y de la interacción pila-suelo no se ven afectadas por el cambio de temperatura.
- Las relaciones entre la fricción del fuste/desplazamiento del fuste, esfuerzos en la cabeza/desplazamientos en la cabeza y esfuerzos en la base/desplazamientos en la base son conocidas (Peron *et al.*, 2011).
- Las propiedades de la pila como el diámetro (D), el módulo de Young (E) y el coeficiente de expansión térmica  $(\alpha)$ , no cambian bajo el efecto de la temperatura y permanecen constantes a lo largo del elemento.
- El comportamiento de la pila se considera linealmente elástico y su peso es despreciado en los cálculos.
- Los desplazamientos hacia arriba y las tensiones son consideradas positivas. Los desplazamientos hacia abajo y los esfuerzos de compresión tienen signo negativo.

#### 3.1.2.2. Curvas ts-z y tb-z

Las curvas de transferencia de carga empleadas para describir los esfuerzos movilizados en el fuste  $(t_s-z)$  y la base  $(t_b-z)$  de la pila se presentan en la Figura 3.1. Estas fueron desarrolladas por Frank y Zhao (1982), a partir del comportamiento observado en pilas durante pruebas de carga *in situ*. Para su construcción se requiere definir una pendiente inicial y el valor de esfuerzo que establece el inicio del comportamiento plástico del material.

Para obtener la pendiente de la rama lineal en donde las deformaciones del suelo se comportan de forma elástica, Frank y Zhao (1982) propusieron las siguientes expresiones:

$$K_s = \frac{\alpha_s E_M}{D}$$
 y  $K_b = \frac{\alpha_b E_M}{D}$  (3.1)

donde  $E_M$ : es el módulo de Menard, D es el diámetro de la pila,  $K_s$  y  $K_b$  son las pendientes en las funciones de transferencia de carga para el fuste y la base, respectivamente. Para suelos cohesivos  $\alpha_s = 2$  y  $\alpha_b = 11$  y para suelos granulares  $\alpha_s = 0.8$  y  $\alpha_b = 4.8$  (Abchir, 2016). El valor de la pendiente permanece constante hasta que la resistencia unitaria sea igual a la mitad de la capacidad de carga por fricción ( $q_s$ ) o por punta ( $q_b$ ), dependiendo del caso. A partir de estos valores, la pendiente de las curvas se reduce a un valor de K<sub>s</sub>/5 (para la resistencia a la fricción) y K<sub>b</sub>/5 (para la reacción en la base de la pila) hasta alcanzar los valores últimos de la capacidad de carga  $q_s$  y  $q_b$ .



Figura 3.1. Curvas de transferencia de carga propuestas por Frank y Zhao (1982): (a) evolución de la resistencia a la fricción movilizada ts con respecto al desplazamiento de la pila, (b) evolución de la reacción en la base movilizada tb respecto al desplazamiento de la pila (adaptado de Knellwolf *et al.*, 2011)

Para tomar en cuenta la disminución de la resistencia a la fricción debida al desplazamiento relativo que se produce al calentar/enfriar el elemento, Knellwolf *et al.* (2011) propusieron integrar una rama de descarga cuyas pendientes son  $K_s$  y  $K_b$ . Los valores máximos para la capacidad de carga son generalmente determinados mediante reglas o códigos de diseño y pueden ser relacionados con los parámetros de suelo mediante métodos clásicos de cálculo. Algunas de las aproximaciones utilizan parámetros de resistencia al corte del suelo ( $c_u$  o c y  $\phi$ ) o propiedades del suelo como la presión límite de Menard  $p_{LM}$ .

Generalmente, el diámetro de la pila interviene en la forma de la pendiente inicial en las curvas t-z. Tomlinson & Woodward (2008) reportaron un desplazamiento para la movilización completa de 0.3-1% del diámetro para la resistencia a la fricción y de 10-20% del diámetro para la resistencia de la punta. Para que la punta de la pila se movilice por completo requiere un mayor desplazamiento, por lo cual la mayor parte de la carga es soportada por la fricción en el fuste bajo cargas menores.

#### 3.1.2.3. Desplazamiento de la pila

Para el cálculo del desplazamiento, la pila se divide en una serie de *N* elementos rígidos conectados mediante resortes que representan la rigidez de la cimentación (Figura 3.2a). Los resortes distribuidos a lo largo del fuste consideran la interacción elastoplástica que existe con el suelo circundante y el resorte ubicado en el elemento de la base está soportado por la reacción elastoplástica del estrato resistente. Este criterio de discretización permite considerar diferentes tipos de suelo y variaciones en sus propiedades, lo cual representa una gran ventaja ya que la capacidad de carga se ve afectada por la relación de la resistencia al corte de cada estrato.

En la solución térmica, a diferencia del análisis mecánico, se añade un resorte en la cabeza de la cimentación para representar la restricción de la superestructura (Figura 3.2b). En este caso, mientras la pila de energía se mueve debido a las variaciones de temperatura, la carga *P* representa el peso del edificio que permanece sin cambio.

A partir de las funciones de carga descritas en el apartado anterior se obtiene la relación entre la movilización de la resistencia a la fricción y la base, contra los desplazamientos propuestos ( $t_s$ -z y  $t_b$ -z). Por lo tanto, el resorte adicional considerado para la carga térmica estará representado por una rigidez constante  $K_h$  y la resistencia en la cabeza ( $t_h$ ) será igual a  $t_h = K_h z$ .



Figura 3.2. Modelo de diferencias finitas para pilas de energía: (a) Modelo para carga mecánica (z<sub>i</sub>: desplazamiento del segmento de pila i), (b) modelo de carga térmica (z<sub>i</sub>: desplazamiento del segmento de pila i) (modificado de Knellwolf *et al.*, 2011)

#### 3.1.2.4. Análisis con carga mecánica

El método desarrollado por Chen y McCartney (2016) se basa en un proceso iterativo en el cual se propone un desplazamiento  $z_b$  en la punta de la pila, que se corrige en cada iteración hasta lograr el equilibrio con la condición límite impuesta en la cabeza de la cimentación.

Cada segmento *i*, de longitud *L*, diámetro *D* y sección *A*, debe satisfacer el equilibrio vertical en cada iteración. En la Figura 3.3 se presentan las variables de la geometría típica de cada elemento, donde  $Q_{b, M}$  es la fuerza axial actuando en la base,  $Q_{s, M}$  es la fuerza cortante aplicada en cada segmento y  $Q_{t, M}$  es la fuerza axial en la cabeza. Los desplazamientos axiales son  $z_{b, M}$  para la base,  $z_{s, M}$  a la mitad del segmento y  $z_{t, M}$  en la cabeza.



Figura 3.3. Esquema de un elemento de la pila,  $Q_{b, M}$  es la fuerza axial actuando en el fondo,  $Q_{s, M}$  es la fuerza aplicada en la zona lateral del segmento,  $Q_{t, M}$  es la fuerza axial en la cabeza (modificado de Chen y McCartney, 2016)

Para definir el comportamiento de cada elemento, primero se supone el desplazamiento en la base  $z_{b, M}$  y se calcula la reacción de la punta a partir de las curvas de transferencia de carga  $t_{b-z}$ . Conociendo este valor se obtiene la fuerza axial  $Q_{b, M}$  y suponiendo que la fuerza actuante en la cabeza  $Q_{t, M}$  es inicialmente cero, se calcula la fuerza axial media en cada segmento:

$$Q_{ave} = (Q_{b,M} + Q_{t,M})/2 \tag{3.2}$$

La compresión elástica  $\Delta_M$  se obtiene con la aplicación de la Ley de Hooke, relacionando la fuerza axial media  $Q_{ave}$  y la rigidez de cada elemento  $K_i$ , como sigue:

$$\Delta_M = Q_{ave}/K_i \tag{3.3}$$

De acuerdo con lo anterior, se puede obtener el valor del desplazamiento lateral del elemento  $z_{s, M}$  al sumar la compresión elástica con el desplazamiento propuesto en la base de la sección analizada  $z_{b, M}$ :

$$z_{s,M} = z_{b,M} + \frac{1}{2}\Delta_M$$
(3.4)

En función del valor obtenido de  $z_{s, M}$ , se deduce la fuerza cortante  $Q_{s, M}$  con la curva  $t_{s-z}$  y se resuelve la parte inferior del elemento. Posteriormente, se define una nueva fuerza axial en

la cabeza de la sección  $Q_{t, M, nueva}$ , sumando la fuerza en la base y la fuerza actuando en la interfaz del segmento para establecer equilibrio, como se presenta a continuación:

$$Q_{t,M,nueva} = Q_{b,M} + Q_{s,M} \tag{3.5}$$

Si la diferencia entre la nueva fuerza axial y la carga propuesta anteriormente para la cabeza del elemento no es menor a la tolerancia definida por el usuario, se calcula la fuerza media (ec. 3.2) sustituyendo la nueva fuerza axial obtenida  $Q_{t, M, nueva}$  y se repite el proceso de forma iterativa hasta que los valores converjan. Finalmente, se obtiene el desplazamiento en la cabeza del elemento sumando el asentamiento en la base con la compresión elástica  $\Delta_M$  que relaciona las fuerzas obtenidas anteriormente:

$$z_{t,M} = z_{b,M} + \Delta_M \tag{3.6}$$

Para continuar con la solución de la pila, se acepta que el desplazamiento  $z_{t, M}$  es igual al desplazamiento del fondo  $(z_{b, M})$  del siguiente segmento y el procedimiento para cada elemento sucesivo se repite hasta llegar a la cabeza de la cimentación. Sin embargo, la carga *P* transferida por el peso del edificio y la fuerza axial de la cabeza  $Q_{t, M}$  no necesariamente serán iguales. Al respecto, se utiliza una variación del método Newton-Raphson para encontrar el desplazamiento en la base de la pila que iguala la fuerza calculada en la cabeza con la carga real de la estructura. El método consiste en sustituir la derivada de la función en el punto de estudio por una recta secante que se aproxima a la raíz que se quiere encontrar:

$$k_{sec} = Q_{b,M} / z_{b,M} \tag{3.7}$$

Una vez que se obtiene este valor, se calcula el nuevo desplazamiento en la base de la pila  $z_{b,}$ <sub>*M*,*nuevo*</sub> con la siguiente fórmula:

$$z_{b,M,nuevo} = z_{b,M} + k_{sec} \left( P - Q_{t,M} \right)$$
(3.8)

donde *P* es la carga mecánica transferida por el peso del edificio y  $Q_{t, M}$  es la fuerza en la cabeza obtenida por equilibrio. Con el nuevo desplazamiento en la punta de la cimentación, se repite el cálculo hasta que la diferencia entre la carga real y la calculada en la parte superior de la pila sea menor que la tolerancia establecida.

#### 3.1.2.5. Análisis con carga térmica

En el diseño térmico de las pilas de energía se tiene que considerar que existen desplazamientos adicionales producidos por la expansión y contracción del elemento, además se debe calcular la distribución de la resistencia movilizada en la base y la interfaz

pila-suelo. La tercera cuestión que se requiere analizar se refiere a las variaciones de los esfuerzos normales en las pilas inducidos por las dilataciones y contracciones restringidas (Burlon *et al.*, 2013). En este contexto, es importante determinar la localización del punto nulo (*NP*) para evaluar la respuesta de la cimentación durante las variaciones de temperatura (Figura 3.4).



Figura 3.4. Modelo de diferencias finitas para pilas de energía: (a) Modelo de carga térmica (zi: desplazamiento del segmento de pila i), (b) fuerzas externas movilizadas por carga térmica (modificado de Knellwolf *et al.*, 2011)

El punto nulo (*NP*) es donde la magnitud del desplazamiento relativo pila-suelo debido a las variaciones de temperatura es cero. Su ubicación depende de la rigidez de las fronteras (provista por la superestructura en la cabeza y la presencia de un estrato de suelo rígido en la punta) y la fricción movilizada en el fuste (Murphy *et al.*, 2015). De acuerdo con Knellwolf *et al.* (2011), el *NP* se encuentra a una profundidad donde la suma de la fricción movilizada a lo largo de la parte superior más la reacción de la estructura es igual a la suma de la fricción movilizada a lo largo de la parte inferior más la reacción en la base, es decir:

$$\sum_{i=1}^{n_1} Q_{s,T} + Q_{t,T} = \sum_{i=n_1+1}^{N} Q_{s,T} + Q_{b,T}$$
(3.9)

Es importante señalar que, durante los ciclos de temperatura las deformaciones ocurren alrededor del punto nulo ya que éste no se desplaza y sirve como punto de referencia. Con base en este concepto, la pila puede ser dividida en dos zonas delimitadas por esta condición. Al calentarse, la porción de la pila sobre el punto nulo se desplaza hacia arriba y la parte de abajo se mueve en sentido contrario. Por otra parte, durante el enfriamiento, la sección de la pila por debajo del punto nulo se contrae y la superior se asienta. Aunado a ello, la capacidad de carga movilizada  $Q_{mov}$  se encuentra dividida en la fracción actuante sobre la parte superior de la pila  $Q_{mov, sup}$  y la que actúa en la porción inferior  $Q_{mov, inf}$ .

$$Q_{mov} = Q_{mov,sup} + Q_{mov,inf} \tag{3.10}$$

$$Q_{mov,sup} = Q_{s,mov,sup} \tag{3.11}$$

$$Q_{mov,inf} = Q_{b,mov} + Q_{s,mov,inf}$$
(3.12)

La resistencia a la fricción movilizada a lo largo del fuste en la zona superior de la pila  $Q_{smov,sup}$  disminuye debido a los desplazamientos axiales que se desarrollan hacia arriba al calentar la cimentación y dependiendo de su magnitud se puede generar fricción negativa. En cambio, la resistencia movilizada en la base  $Q_{mov, inf}$  crece en función de los desplazamientos térmicos inducidos actuando hacia abajo.

Para el cálculo térmico, se propone el caso en el cual la cimentación se encuentra sujeta únicamente a cargas de calentamiento/enfriamiento y se supone la localización del punto nulo (*NP*). Con base en lo anterior, la fracción de la pila arriba del *NP* se divide en  $n_1$  elementos y la porción que se encuentra debajo en  $n_2$  elementos (Figura 3.4). Considerando que la estructura es completamente libre de moverse, la elongación térmica inicial ( $\Delta_T$ ) se calcula como:

$$\Delta_T = -l_i \alpha \Delta T \tag{3.13}$$

Donde  $l_i$  es la longitud de cada segmento,  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica de la pila y  $\Delta T$  el cambio de temperatura aplicado. Esta elongación térmica se encuentra restringida por el suelo circundante, el cual genera fuerzas de expansión o compresión en la pila. Sin embargo, en el *NP* no existen desplazamientos y el primer elemento por debajo de esta zona (definido como NP + 1) presentará movimientos únicamente en el fondo. Su comportamiento estará definido por las siguientes ecuaciones:

$$z_{t,T}^{np+1} = 0 (3.14)$$

$$z_{s,T}^{np+1} = -\frac{\Delta_T^{NP+1}}{2}$$
(3.15)

$$z_{b,T}^{np+1} = -\Delta_T^{NP+1}$$
(3.16)

Los desplazamientos del resto de los elementos por debajo del punto nulo se determinan como sigue:

$$z_{t,T}^{i} = z_{b,T}^{i-1} \tag{3.17}$$

$$z_{s,T}^{i} = z_{t,T}^{i} - \frac{\Delta_{T}^{i}}{2}$$
(3.18)

$$z_{b,T}^{i} = z_{t,T}^{i} - \Delta_{T}^{i}$$
(3.19)

Una vez que se obtiene el desplazamiento en la punta, se calculan la fuerza en la base  $Q_{b, T}y$  la fuerza cortante  $Q_{s, T}$  a partir de las curvas de transferencia de carga correspondientes. A partir de estos valores, se definen las cargas actuantes en cada elemento hasta llegar al punto nulo. La carga axial en la cabeza se calcula con la ecuación 3.20 y el esfuerzo térmico se determina con la ecuación 3.21:

$$Q_{t,T} = Q_{b,T} + Q_{s,T} (3.20)$$

$$\sigma_T = \frac{Q_{t,T} + Q_{b,T}}{2A_b} \tag{3.21}$$

Posteriormente, para definir el comportamiento de cada elemento se calcula la nueva elongación térmica de la siguiente forma:

$$\Delta_{Tnueva} = \Delta_T - \frac{\sigma_T \cdot l_i}{E} \tag{3.22}$$

El nuevo desplazamiento, será diferente al que se presenta cuando la cimentación no tiene restricciones en el fondo. Así, este valor se debe reemplazar por la elongación térmica calculada anteriormente ( $\Delta_T$ ) y se repite el proceso hasta que los valores convergen. Para resolver la fracción de la pila arriba del punto nulo, se supone que los elementos se expanden o contraen durante el calentamiento y enfriamiento, respectivamente. A partir de esta suposición, se calculan los desplazamientos:

$$z_{b,T} \begin{cases} 0 & para \ i = N_1 \\ z_{t,T}^{i+1} & para \ i \neq NP - 1 \end{cases}$$
(3.23)

$$z_{s,T} = z_{t,T} + \frac{\Delta_T}{2} \tag{3.24}$$

$$z_{t,T} = z_{t,T} + \Delta_T \tag{3.25}$$

Al llegar a la parte superior de la pila (*i*=1), se define la fuerza cortante  $Q_{s, T}$  a partir de la curva  $t_{s-z}$  y las cargas actuantes en cada segmento con las siguientes fórmulas:

$$Q_{t.T}\begin{cases} K_h \cdot z_{t,T} & para \ i = 1\\ Q_{b,T}^{i-1} & para \ i \neq 1 \end{cases}$$
(3.26)

$$Q_{b,T} = Q_{t,T} - Q_{s,M} \tag{3.27}$$

 $K_h$  es la rigidez del resorte impuesto en la cabeza de la cimentación, para representar la restricción de la superestructura en el análisis térmico. Finalmente, se calcula la nueva elongación térmica y se verifica que la diferencia con el valor propuesto anteriormente sea menor a la tolerancia definida por el usuario.

#### 3.1.2.6. Análisis con cargas termo-mecánicas

El primer paso consiste en obtener la distribución de fuerzas axiales y desplazamientos a lo largo de la pila a partir de una carga mecánica. Una vez que se tienen estos valores, se realiza el cálculo térmico y se acoplan ambos resultados para definir la respuesta general del elemento. Por lo tanto, el proceso termo-mecánico inicia suponiendo la localización del punto nulo. Para los elementos debajo del *NP* los desplazamientos se calculan a partir del segmento  $NI_{+1}$  a *N* con las siguientes fórmulas:

$$z_{t.TM} \begin{cases} z_{t,M} & para \ i = N_{1+1} \\ z_{t,M} + z_{t,T} & para \ i \neq N_{1+1} \end{cases}$$
(3.28)

$$z_{s,TM} = z_{s,M} + z_{s,T} (3.29)$$

$$z_{b,TM} = z_{b,M} + z_{b,T} (3.30)$$

En función de los desplazamientos obtenidos, se calculan las fuerzas axiales comenzando desde la base de la pila hasta el elemento que se encuentra por debajo del punto nulo (NI+I). La resistencia unitaria por punta  $tb_T$  (el subíndice T indica que se trata de un cálculo térmico) se obtiene con la curva  $t_{b-Z}$  y se multiplica por el área  $A_b$  para obtener la fuerza axial en el elemento ubicado en la base de la pila. El cálculo de la fuerza cortante es similar, sin embargo, en este caso la resistencia unitaria en el fuste se deduce a partir de la curva  $t_{s-Z}$  y se multiplica por el área lateral del segmento analizado:

$$Q_{b.TM} \begin{cases} tb_T \cdot Ab & para \ i = N \\ Q_{b,TM}^{i+1} & para \ i \neq N \end{cases}$$
(3.31)

$$Q_{s,TM} = ts_T \cdot As \tag{3.32}$$

$$Q_{t,TM} = Q_{s,TM} + Q_{b,TM}$$
(3.33)

Posteriormente, se calculan los esfuerzos y la nueva elongación térmica con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{TM} = \frac{Q_{aveTM}}{A_b} = \frac{Q_{t,TM} + Q_{b,TM}}{2A_b}$$
(3.34)

$$\Delta_{TMnueva} = \Delta_T - \frac{\sigma_{TM} \cdot l_i}{E}$$
(3.35)

La nueva elongación térmica será menor al conjunto de desplazamientos calculados cuando la pila es libre de moverse. Por ello, este valor se reemplaza en las ecuaciones 3.15 a 3.19 y se obtiene un nuevo conjunto de desplazamientos térmicos hasta que la fracción de la pila por debajo del punto nulo converja. Para determinar los desplazamientos sobre el punto nulo el cálculo comienza a partir del elemento *NI* hasta llegar a la cabeza de la cimentación y se utilizan las ecuaciones definidas a continuación:

$$z_{b,TM} \begin{cases} z_{b,M} & para \ i = N_1 \\ z_{b,M} + z_{b,T} & para \ i \neq N_1 \end{cases}$$
(3.36)

$$z_{s,TM} = z_{s,M} + z_{s,T} (3.37)$$

$$z_{t,TM} = z_{t,M} + z_{t,T} (3.38)$$

Una vez que se obtienen los desplazamientos en la parte superior de la pila, se calculan las fuerzas axiales de cada elemento hasta llegar nuevamente al punto nulo y a partir de estos datos se determinan los esfuerzos termo-mecánicos en el segmento analizado.

$$Q_{t.TM} \begin{cases} P - K_h \cdot z_{t.T} & para \ i = 1 \\ Q_{hTM}^{i-1} & para \ i \neq N \end{cases}$$
(3.39)

$$\begin{array}{ll} \left(Q_{b,TM}^{\iota} & para \ \iota \neq N \\ Q_{s,TM} = ts_T \cdot As \end{array} \right)$$

$$(3.40)$$

$$Q_{b,TM} = Q_{t,TM} - Q_{s,TM}$$
(3.41)

$$\sigma_{TM} = \frac{Q_{aveTM}}{A_b} = \frac{Q_{t,TM} + Q_{b,TM}}{2A_b}$$
(3.42)

Finalmente, se calcula la nueva elongación térmica con la ecuación 3.35 y se repite este proceso de forma iterativa hasta que la fracción de la pila arriba del punto nulo converja. Sin embargo, es complicado que este proceso de aproximación sea eficiente debido a la rigidez impuesta en la base y cabeza de la pila. Para solucionar este problema, Chen y McCartney (2016) propusieron la siguiente fórmula:

$$\Delta_{Tnueva} = \Delta_T - m \cdot \frac{\sigma_{TM} \cdot l_i}{E}$$
(3.43)

Donde m es una constante que reduce las variaciones entre el valor anterior de la elongación térmica y el nuevo, en un rango que permita aproximarse a la solución con un menor número de iteraciones. Una vez que toda la pila converge, se calcula la fuerza no balanceada con la ecuación 3.44:

$$F_{unb} = |Q_{t,TM}^{NP+1}| - |Q_{b,TM}^{NP}|$$
(3.44)

Si la fuerza no balanceada es negativa, el punto nulo real se ubica por debajo del punto nulo propuesto inicialmente y es necesario ajustar su valor. En cambio, si la fuerza no balanceada es positiva, el punto nulo real se ubica sobre el punto nulo propuesto inicialmente. Este proceso continuará hasta que la *Funb* sea menor que la tolerancia definida por el usuario y el comportamiento termo-mecánico de la pila esté resuelto.

# 3.1.2.7. Implementación del algoritmo *EPiles* en lenguaje Matlab ® para el análisis y diseño de pilas de energía

En este apartado se presenta el diagrama de flujo del código denominado (*EPiles*), implementado en esta tesis en lenguaje Matlab ® (Figura 3.5). El código se fundamenta en curvas de transferencia de carga para la solución de la respuesta termo-mecánica en pilas de energía. El algoritmo propuesto se divide en tres módulos para mejorar la eficiencia de cálculo y facilitar su programación. En el primero de ellos, se obtienen las fuerzas y desplazamientos mecánicos con base en los parámetros geotécnicos ingresados por el usuario (Figura 3.6). A partir de los resultados anteriores, en el segundo módulo se realiza el cálculo termo-mecánico (Figura 3.7) hasta que todos los valores converjan y se cumplan las condiciones impuestas para el caso de estudio. Finalmente, en el tercer módulo se capturan los datos del suelo, de la cimentación y las condiciones de carga del modelo. En el Anexo II se describe con mayor detalle el funcionamiento de cada una de estas subrutinas.

El programa permite obtener resultados de esfuerzos, resistencia a la fricción, deformaciones, cargas axiales y desplazamientos verticales. Además, permite introducir diferentes parámetros geotécnicos para cada estrato de suelo analizado. Para validar el funcionamiento del algoritmo, se realizaron tres calibraciones utilizando datos experimentales de esfuerzos y deformaciones en pilas de energía publicados en la literatura internacional (Anexo I).



Figura 3.5. Diagrama de flujo propuesto del algoritmo *EPiles* implementado en Matlab ® para el análisis y diseño de pilas de energía



Figura 3.6. Diagrama de flujo propuesto del módulo mecánico de EPiles programado en Matlab ®



Figura 3.7. Diagrama de flujo propuesto del módulo termo-mecánico de *EPiles* programado en Matlab ®

#### 3.1.3. Modelos numéricos con elementos finitos

El modelado numérico permite simular las interacciones suelo-estructura y la no linealidad del suelo bajo distintas condiciones térmicas. En estos métodos el modelo matemático

continuo se transforma en un problema con un número finito de grados de libertad, el cual reproduce una aproximación de las condiciones reales por analizar. Los principales métodos para la modelación de pilas de energía se basan en el uso de elementos finitos o diferencias finitas y a menudo sus resultados deben validarse con datos obtenidos a partir de pruebas de campo.

Laloui *et al.* (2006) emplearon elementos finitos para simular un modelo termo-hidromecánico acoplado de la respuesta de una pila instalada en el Instituto Federal de Tecnología de Suiza en Lausanne, la cual estaba sujeta a diferentes cambios de temperatura con y sin carga mecánica. En el análisis se consideró a la pila como un material termo-elástico y el suelo se representó como termo-elastoplástico de acuerdo con las características obtenidas durante la prueba *in situ*. Con la finalidad de evaluar la disipación de calor entre la cimentación y el suelo al finalizar el ciclo térmico, se impuso una frontera a lo largo del fuste cuya temperatura varía con el tiempo. Finalmente, se compararon los resultados numéricos con los experimentales y se encontró un buen ajuste en términos de desplazamientos, sin embargo, los esfuerzos y deformaciones fueron ligeramente menores a las observaciones de campo.

Di Donna *et al.* (2013) plantearon una solución termo-hidro-mecánica en 2D para representar un caso hipotético de un sistema conformado por 105 pilas, sujetas a cambios estacionales de temperatura. Se consideró que la estructura estaba cimentada en arcillas normalmente consolidadas, las cuales exhiben generalmente un comportamiento termoplástico, por lo cual se utilizó un modelo constitutivo previamente desarrollado llamado ACMEG-T (Laloui y François, 2009) que permite representar este tipo de perfiles y acoplarlo al mecanismo de transferencia de calor. Bajo estas condiciones se observó que la baja permeabilidad del suelo contribuía al incremento de la presión de poro durante la etapa de calentamiento y disminuía al enfriarse. Además, las cargas adicionales obtenidas indicaron que su magnitud no representaba un riesgo estructural para la capacidad del concreto.

Dupray *et al.* (2014) examinaron el mismo sistema de pilas que Di Donna *et al.* (2013) desde la perspectiva térmica y mecánica. El tipo de suelo se supuso como una arcilla sobreconsolidada la cual se representó con un modelo termo-elástico. En este caso, varió la permeabilidad del suelo para evaluar el efecto que tiene en la generación de presión de poro. Los resultados indican que, al reducir este parámetro bajo un incremento de temperatura, la presión de poro aumenta y como consecuencia los esfuerzos efectivos del suelo disminuyen. Por otra parte, se demostró que la aplicación de ciclos térmicos a toda la cimentación resulta favorable para el comportamiento mecánico del sistema a diferencia del caso en que el calentamiento y enfriamiento se realizan en pilas aisladas. El levantamiento global de la estructura durante los incrementos de temperatura reduce los esfuerzos térmicos inducidos a diferencia de la pila individual. No obstante, debe tomarse en cuenta y compensarse mediante juntas de dilatación si el edificio está vinculado a estructuras cimentadas de otro modo como cimentaciones superficiales o pilas no intercambiadoras de calor.

Ozudogru *et al.* (2014) simularon una pila con un arreglo U doble para la tubería del circuito primario con el objetivo de comprender la respuesta de la estructura bajo esta configuración. También propusieron un Intercambiador de Calor de Pozo (*BHE*, por sus siglas en inglés) cuyo diámetro es menor al de la pila y con una configuración de tubería U simple. El modelo consistió en utilizar elementos 1D para simular el flujo de agua y el intercambio de calor dentro del circuito primario. Estos elementos lineales se acoplaron con el dominio 3D utilizando el campo de temperatura a lo largo de la superficie exterior de la tubería. Para validar la solución numérica se desarrolló un modelo analítico que permite calcular los efectos axiales térmicos en el proceso de intercambio de calor. El BHE presentó un mejor ajuste con el desarrollo analítico, sin embargo, los resultados de la pila indican una correcta estimación de la conductividad térmica y la transferencia de calor del fluido dentro de la tubería. Así, la simplificación numérica propuesta se puede implementar para realizar estimaciones paramétricas de los procesos térmicos en pilas de energía con diferentes configuraciones y geometrías de forma eficiente.

Rotta Loria *et al.* (2015) realizaron un análisis axisimétrico para simular una pila termoactiva instalada en arena saturada, el cual validaron basándose en los resultados de una prueba a escala centrífuga realizada por Ng *et al.* (2014). Para investigar el impacto de diferentes combinaciones de cargas térmicas y mecánicas en el comportamiento de las pilas, se consideraron los resultados de tres casos: el primero consistió en la aplicación de carga mecánica hasta la falla y en las otras dos pruebas el modelo fue cargado con incrementos de temperatura de 15 °C y 30 °C, para posteriormente cargarlo de forma mecánica hasta la falla. Los resultados muestran que la posición del punto nulo depende del valor en las cargas térmicas y mecánicas, este es un efecto de la distribución de esfuerzos en el suelo que permite el equilibrio entre las fuerzas desarrolladas y la expansión térmica de la cimentación. Además, al crecer las cargas termo-mecánicas se transfiere un componente de esfuerzos mayor al pie de la pila y las deformaciones plásticas ocurren en la interfaz pila-suelo afectando la movilización de la resistencia a la fricción a lo largo del fuste.

## 3.2. Métodos de diseño

## 3.2.1. Diseño de pilas de energía con base en los Eurocódigos

Los Eurocódigos se basan en los principios de los estados límite de falla y de servicio. Los estados límite de falla se refieren a la seguridad de la estructura y los de servicio están relacionados con su funcionamiento. Rotta-Loria *et al.* (2020) propusieron una metodología de diseño para pilas de energía de acuerdo con los criterios descritos en los Eurocódigos. Dicho enfoque considera la acción simultánea de las cargas mecánicas y térmicas. A continuación, se describen los aspectos principales de este método.

#### 3.2.1.1. Tipos de acciones e intensidades de diseño

Las acciones se clasifican de acuerdo con su variación en el tiempo en tres tipos: permanentes (G), variables (Q) y accidentales (A). Las permanentes actúan sobre la estructura durante toda

su vida útil y su intensidad varía poco con el tiempo. En cambio, las accidentales alcanzan intensidades significativas durante lapsos breves (Bond y Harris, 2008). Las acciones variables obran sobre los elementos resistentes con intensidades que cambian significativamente con el tiempo y presentan cuatro valores típicos (Figura 3.8) (Gulvanessian, 2001):

- *Valor característico (Q<sub>k</sub>)*. Indica la intensidad máxima que ocurrirá durante la vida útil de la estructura.
- *Valor de combinación* ( $\psi_0 Q_k$ ). Corresponde a la probabilidad reducida de que los valores más desfavorables de las cargas analizadas ocurran simultáneamente.
- *Valor frecuente* ( $\psi_1 Q_k$ ). Se emplea para evaluar estados límite de falla que incluyan acciones accidentales y estados límite de servicio reversibles (deflexiones).
- *Valor cuasi-permanente* ( $\psi_2 Q_k$ ). Se refiere al valor máximo probable en el lapso en que pueda presentarse una acción accidental o más de una acción variable. Se utiliza para verificar los estados límite de falla que incluyan las combinaciones de acciones mencionadas y estados límite reversibles.

Las acciones variables se dividen en dos tipos: dominantes y acompañantes. Las acciones variables dominantes se trabajan con su intensidad máxima (valor característico) y su magnitud corresponde a una determinada probabilidad de no ser superado durante la vida útil de la estructura. Las acciones variables acompañantes se determinan afectando su valor característico ( $Q_k$ ) por un factor de combinación ( $\psi_{0, i}$ ) para indicar un cambio en su intensidad.



Figura 3.8. Clasificación de las acciones variables dependiendo de su frecuencia (adaptado de Gulvanessian, 2001)

De acuerdo con Rotta Loria *et al.* (2020), las cargas térmicas aplicadas a las pilas de energía se pueden considerar como acciones variables, indirectas, libres y estáticas. Lo anterior se basa en la clasificación descrita en los Eurocódigos para las acciones térmicas aplicadas a edificios y puentes.

#### **3.2.1.2.** Combinaciones de acciones

Rotta-Loria *et al.* (2020) recomiendan que el diseño de pilas de energía se realice con referencia al "Enfoque de diseño 1 – Combinación 1", que representa la condición más desfavorable propuesta por los Eurocódigos. En el diseño de cimentaciones con pilas o pilotes, el "Enfoque de diseño 1 – Combinación 1" considera que los factores de carga se aplican solo a las acciones. Por otra parte, en el "Enfoque de diseño 1 - Combinación 2" los factores se aplican principalmente a las propiedades de los materiales.

Las combinaciones de diseño se evalúan de acuerdo con las diferentes condiciones en las que se encuentra la estructura a lo largo de su vida útil (Tabla 3.1). En uso normal, la estructura se encuentra sujeta a una condición persistente. En condiciones temporales, cuando se está construyendo o reparando, se considera que la estructura se encuentra sujeta a una combinación de cargas transitorias. En condiciones excepcionales, como durante un incendio o explosión, la estructura se encuentra sujeta a una combinación accidental o (si es causada por un sismo) una combinación sísmica (Bond y Harris, 2008).

Com	nhinaaián	Factores de combinación para valores característicos							
Con	ndinación	$\Sigma G_{k,i}$	$Q_{k,1}$	$\Sigma Q_{k,j}$	$A_k o A_{E,k}$				
	Persistente	1	1	$\psi_0$	-				
Estado Límite de Falla	Transitoria	-							
	Accidental	1	$\psi_1 \ o \ \psi_2$	$\psi_2$	1				
	Sísmica	1	-	$\psi_0$	1				
	Característica	1	1	$\psi_2$	-				
Estado Límite de Servicio	Frecuente	1	$\psi_1$	$\psi_2$	-				
	Quasi- permanente	1	-	$\psi_2$	-				

Tabla 3.1. Factores de combinación empleados en las diferentes condiciones de acciones para Estado Límite de Falla y de Servicio.

Nota: Donde  $\Sigma Gk,i$  es el valor característico de la carga permanente, Qk,l es el valor característico de la carga variable dominante,  $\Sigma Qk,j$  es el valor característico de la carga variable acompañante,  $A_k$  es el valor característico de la carga accidental,  $A_{E,k}$  el valor característico de la carga sísmica y  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  son los factores de combinación para las cargas variables.

Así, en la revisión por estado límite de falla para la condición persistente se considera únicamente la influencia de las cargas permanentes y variables:

$$E_d = \sum_{j \ge 1} \gamma_{G,j} \, G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \ge 1} \gamma_{Q,i} \, \psi_{0,i} Q_{k,i} \tag{3.45}$$

donde  $E_d$  es la suma de las acciones verticales,  $\gamma_{G,j}$  es el factor de carga parcial para la carga permanente j,  $G_{k,j}$  representa el valor característico de la carga permanente j,  $\gamma_{Q,l}$  es el factor de carga parcial para la carga variable dominante,  $Q_{k,l}$  es el valor característico de la carga variable dominante,  $\gamma_{Q,i}$  es el factor de carga parcial para la carga variable acompañante i,  $Q_{k,i}$ es el valor característico de la carga variable acompañante i,  $\psi_{0,i}$  es el factor de combinación correspondiente a la carga variable i.

#### 3.2.1.3. Factores de carga y de combinación para diseño de pilas de energía

Las acciones deben ser afectadas por su respectivo factor de carga ( $\gamma_{G,i}$  o  $\gamma_{Q,i}$ ) para obtener los valores de diseño. Su magnitud dependerá de las condiciones que se requieran analizar, como se muestra a continuación:

- Las cargas permanentes desfavorables se incrementan un 10% ( $\gamma_G = 1.1$ ) y las favorables se reducen en un 10% ( $\gamma_G = 0.9$ ).
- A las cargas variables desfavorables corresponde un factor  $\gamma_Q = 1.5$  y las favorables se desprecian  $\gamma_Q = 0$ .

Los factores de combinación permiten reducir la magnitud de las cargas aplicadas, para representar la variación de su intensidad durante el tiempo de operación de la estructura. Para pilas de energía, Rotta Loria *et al.* (2020) sugieren el uso de los siguientes valores para los factores de combinación para las cargas térmicas:  $\psi 0 = 0.6$ ,  $\psi 1 = 0.5$  y  $\psi 2 = 0.5$ .

Los factores de combinación  $\psi 0$  y  $\psi_1$  coinciden con los propuestos en los Eurocódigos para edificaciones tradicionales. Se adaptan al caso de pilas de energía debido a la similitud de ocurrencia entre las cargas térmicas aplicadas en edificios y pilas de energía. En el caso de  $\psi_2$ , Rotta-Loria *et al.* (2020) sugieren calcularlo como la relación entre la variación de temperatura media y la variación de temperatura máxima (o mínima) observada a lo largo de ciclos térmicos sucesivos aplicados a las pilas de energía. Para su determinación, estos autores hacen referencia a los datos de monitoreo de temperatura a largo plazo en pilas de energía reportados por Loveridge *et al.* (2016), donde se obtiene un valor de  $\psi_2$ =0.50 para calefacción y refrigeración (Figura 3.9). Los autores explican que este valor se aproxima a la relación entre el valor medio de una onda sinusoidal durante la mitad de un ciclo y el máximo (o mínimo) de esta función durante el mismo ciclo, es decir,  $2/\pi = 0,64$ , que se puede emplear alternativamente para describir la influencia de cargas térmicas y estimación  $\psi_2$ .



Figura 3.9. Temperaturas operativas medias de una pila desde 2012 (adaptada de Loveridge *et al*, 2016)

Rotta Loria *et al.* (2020) recomiendan que, al considerar los efectos de las cargas térmicas en las combinaciones de acciones, se utilice la variación de la temperatura característica ( $\Delta T_k$ ) en lugar del efecto de esta variación de temperatura  $Q_k$  ( $\Delta T_k$ ). Este enfoque es generalmente válido, independientemente de que se realicen análisis que tomen en cuenta un comportamiento mecánico reversible o irreversible del suelo (no se hace la hipótesis de superposición entre las acciones y sus efectos).

#### 3.2.1.4. Estados límite de falla y de servicio

La verificación por estado límite de falla debe cumplir la siguiente desigualdad para las distintas combinaciones de acciones verticales consideradas:

$$E_d \le R_d \tag{3.46}$$

donde  $E_d$  es la suma de las acciones verticales afectadas por su factor de carga correspondiente y  $R_d$  es la resistencia de diseño. En la revisión por estado límite de servicio, los efectos de diseño de las acciones  $E_d$  (asentamientos, deformaciones, etc.) deben ser menores o iguales al valor límite correspondiente de este efecto  $C_d$ .

$$E_d \le C_d \tag{3.47}$$

#### 3.2.2. Diseño de pilas convencionales con base en las NTCDCC-2017

En las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC-2017) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) de 2017,

la verificación de la seguridad en cimentaciones a base de pilas convencionales se divide en estados límite de falla y de servicio. En los apartados siguientes se describen los criterios generales para efectuar esta revisión.

#### 3.2.2.1. Tipos de acciones e intensidades de diseño

De acuerdo con la duración en que obran sobre las estructuras, se consideran tres tipos de acciones:

- <u>Acciones permanentes.</u> En esta categoría se incluye la carga muerta, el empuje estático de suelos y agua, así como desplazamientos y esfuerzos impuestos a la estructura que varían poco con el tiempo.
- <u>Acciones variables.</u> Entre las acciones variables se encuentra la carga viva, deformaciones impuestas y las cargas térmicas. Estas últimas se incluyen en la clasificación, debido a que durante el proceso de transferencia de calor producen variaciones de temperatura significativas en la cimentación.
- <u>Acciones accidentales.</u> Se consideran en esta clasificación los efectos del viento, sismos, cargas de granizo, explosiones y otros fenómenos extraordinarios.

Con base en lo señalado por las NTCDCC (2017), las acciones permanentes deben tomar en cuenta la variabilidad de las dimensiones de los elementos, pesos volumétricos y otras propiedades relevantes de los materiales, para determinar el valor máximo probable de la intensidad. Para las acciones variables, su intensidad se modificará dependiendo el tipo de combinación que se requiera evaluar:

- <u>Intensidad máxima.</u> Se refiere al valor máximo probable durante la vida útil de la estructura. Se utiliza para combinarse con los efectos de las acciones permanentes.
- <u>Intensidad instantánea</u>. Indica el valor máximo probable en el lapso en que pueda presentarse una acción accidental, como sismo o viento. Se emplea en combinaciones que incluyen más de una acción variable o acciones accidentales.
- **Intensidad media.** Es el valor promedio que tome la acción en un lapso de varios años y se considera en las estimaciones de efectos a largo plazo.

De acuerdo con las NTCDCC (2017) los cambios de temperatura se clasifican como acciones variables por su incidencia sobre la estructura. Los efectos de las deformaciones impuestas, tales como las causadas por los cambios de temperatura, se deben calcular considerando inicialmente los cambios totales en longitud y curvatura de los miembros estructurales. Conocidos estos cambios totales de los miembros individuales, se debe efectuar el análisis de la estructura como un conjunto, cumpliendo las condiciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones.

#### 3.2.2.2. Combinaciones de acciones

Las combinaciones de acciones que se emplean en el diseño de cimentaciones son las siguientes:

• Primer tipo de combinación: Acciones permanentes más acciones variables.

Se incluyen todas las acciones permanentes que obren sobre la estructura y las acciones variables, de las cuales la más desfavorable se considera con intensidad máxima y el resto con intensidad instantánea. Para estados límite de servicio se toman con su intensidad media.

• Segundo tipo de combinación: Acciones permanentes más acciones variables y acciones accidentales.

Con este tipo de combinación se evalúan los efectos por sismo o viento. Se consideran todas las acciones permanentes, las acciones variables con sus valores instantáneos y únicamente una acción accidental en cada análisis.

#### **3.2.2.3.** Factores de carga

Los efectos de todas las acciones deben ser afectados por su respectivo factor de carga ( $F_c$ ). Este valor numérico es asignado dependiendo del grado de precisión con el que se pueda evaluar la carga, la variación que presente durante la vida útil de la estructura y la probabilidad de ocurrencia de cada combinación de acciones:

- A la primera combinación de carga corresponde un factor de 1.3 a las acciones permanentes y 1.5 a las variables, cuando se trate de edificaciones del Grupo B. En el diseño de edificaciones incluidas en el Grupo A, los factores de carga serán iguales a 1.5 para cargas permanentes y 1.7 para cargas variables.
- A la segunda combinación, se aplica un factor de carga igual a 1.1 en todas las acciones que se incluyan en la combinación.
- Para la revisión del estado límite de servicio se aplica un factor de carga unitario en todos los casos.

Las edificaciones del Grupo A incluyen todas aquellas cuya falla estructural podría tener consecuencias particularmente graves como: un número elevado de pérdidas humanas, pérdida de material de gran valor histórico y aquellas que es necesario mantener en operación aún después de un sismo de magnitud importante. Las edificaciones del Grupo B incluyen aquellas estructuras comunes destinadas a viviendas, oficinas y locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no incluidas en el Grupo A.

#### 3.2.2.4. Estado límite de falla

En la revisión por estado límite de falla se debe cumplir la siguiente desigualdad para las distintas combinaciones de acciones verticales consideradas:

$$\Sigma QF_c < R \tag{3.48}$$

donde  $\Sigma QF_c$  es la suma de las acciones verticales afectadas por su factor de carga correspondiente y *R* es la capacidad de carga reducida (afectada por el factor de resistencia correspondiente). Dado que este trabajo se enfoca en el estudio de una pila de energía instalada en suelos granulares, sólo se abordan las fórmulas de capacidad de carga para suelos friccionantes. La capacidad de carga del fuste  $C_f$ , se expresa como:

$$C_f = q_s A_f = P_P F_R \sum_{i=1}^m \bar{p}_{vi} \beta_i L_i$$
(3.49)

donde  $q_s$  es la resistencia cortante unitaria en la interfaz pila-suelo,  $A_f$  el área del fuste,  $P_P$  el perímetro de la pila,  $F_R$  es un factor de resistencia igual a 0.65, m el número de estratos friccionantes,  $\bar{p}_{vi}$  es la presión vertical efectiva debida al peso del suelo (a la profundidad media del estrato i),  $\beta_i$  el coeficiente de fricción elemento-suelo del estrato i y  $L_i$  la longitud de la pila correspondiente al estrato i. El coeficiente  $\beta_i$  se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\beta_i = 1.5 - 0.24\sqrt{z_i}; \quad 0.25 \le \beta \le 1.2$$
(3.50)

El valor  $z_i$  se refiere a la profundidad media del estrato *i*. La capacidad de carga por punta en  $C_p$  se determina como se muestra a continuación:

$$C_p = q_b A_p = (\bar{p}_v N_q^* F_R + p_v) A_p \tag{3.51}$$

donde  $q_b$  es la resistencia unitaria de la punta,  $A_b$  la sección transversal de la punta,  $\bar{p}_v$  es la presión vertical efectiva debido al peso del suelo (a la profundidad de desplante de la pila),  $F_R$  un factor de resistencia que igual a 0.35,  $p_v$  la presión vertical total a la profundidad de desplante,  $A_p$  el área transversal de la base de la pila y  $N_q^*$  el coeficiente de capacidad de carga definido por:

$$N_q^* = N_{min} + L_e \frac{N_{max} - N_{min}}{4Btan(45^\circ + \phi/2)}$$
(3.52)

donde  $L_e$  es la longitud de la pila empotrada en el estrato friccionante, *B* el ancho o diámetro de la pila,  $N_{mín}$  se determina en función del ángulo de fricción interna  $\phi$  de acuerdo con la Tabla 3.1, y  $N_{máx}$  se determina como:

$$N_q^* = N_{m\acute{a}x} \tag{3.53}$$

47

cuand	lo I	$L_e/B$	$\leq 4$	tan	(45°	+φ/2),	o a	partir	de l	la T	Fabla	3.1	cuando	L <sub>e</sub> /B	>	4 tan	(45)	°+¢//	2).
-------	------	---------	----------	-----	------	--------	-----	--------	------	------	-------	-----	--------	-------------------	---	-------	------	-------	-----

φ	<b>20</b> °	<b>25</b> °	<b>30</b> °	<b>35</b> °	<b>40</b> °	<b>45</b> °
Nmáx	12.5	26	55	132	350	1000
Nmín	7	11.5	20	39	78	130

Tabla 3.2. Valor de N<sub>máx</sub> y N<sub>mín</sub> para el cálculo de N<sub>q</sub>\* (NTCDCC, 2017)

Cuando se presentan condiciones geométricas y estratigráficas complejas, se recomienda recurrir a métodos de modelación numérica. Para este caso, la capacidad de carga se determina incrementando las acciones por ensayo y error hasta definir el mecanismo de falla. La carga alcanzada debe afectarse por un factor de reducción  $F_R$  igual a 0.35 para pilas apoyadas en estratos friccionantes, y así obtener la capacidad de carga reducida (R).

#### 3.2.2.5. Estado límite de servicio

La revisión de pilas ante estado límite de servicio se realiza tomando en cuenta los límites permisibles ante movimientos verticales especificados en las NTCDCC (2017). Los asentamientos de este tipo de cimentación se calculan considerando la deformación propia del elemento bajo las diferentes combinaciones de acciones a las que se encuentran sujetas, incluyendo, los estratos localizados bajo el nivel de apoyo de la punta. En este trabajo se utiliza el método de transferencia de carga programado en lenguaje Matlab ® para evaluar los desplazamientos de la pila analizada y posteriormente compararlos con la normativa.

#### 3.2.2.6. Cimentaciones especiales

Cuando se pretenda utilizar dispositivos especiales de cimentación, como las pilas de energía, deberá solicitarse la aprobación expresa de la Administración. Para ello se presentarán los resultados de los estudios y ensayes a que se hubieran sometido dichos dispositivos. Los sistemas propuestos deberán proporcionar una seguridad equivalente a la de las cimentaciones tradicionales calculadas de acuerdo con las NTCDCC (2017).

# 3.2.3. Propuesta de adaptación de las recomendaciones para diseño de pilas de energía con base en los Eurocódigos a las NTCDCC-2017 de México

En este apartado se presenta una propuesta de adaptación de las recomendaciones de diseño desarrolladas por Rotta-Loria *et al.* (2020) para integrar el efecto de los cambios de temperatura en la respuesta mecánica de las pilas de energía con base en los Eurocódigos a las especificaciones descritas en las NTCDCC (2017) de México para estructuras especiales. El método de revisión propuesto supone que, si los estados límite no son excedidos para los efectos de las acciones termo-mecánicas, la cimentación es adecuada.

Al igual que en las NTCDCC (2017), los Eurocódigos consideran tres categorías de acciones de acuerdo con su variación en el tiempo: *permanentes, variables y accidentales*. Además, las intensidades de diseño descritas en el inciso 3.2.2.2 son similares a los valores típicos

para acciones variables expuestos en los Eurocódigos. Este enfoque permite fijar la magnitud de todas las acciones pertinentes y su variabilidad sobre la cimentación. En la Tabla 3.3 se resumen las equivalencias entre ambas normativas:

<b>NTCDCC (2017)</b>	Equivalencia con Eurocódigos				
$C_p, C_v$	$G_k, Q_k$				
Fc	γ <i>G</i> , γ <i>Q</i>				
Intensidad máxima	Valor característico ( $Q_k$ )				
Intensidad media	Valor frecuente ( $\psi_1 Q_k$ )				
Intensidad instantánea	Valor cuasi-permanente ( $\psi_2 Q_k$ )				

Tabla 3.3. Equivalencias de diseño entre las NTCDCC (2017) y los Eurocódigos

Nota:  $C_p$  es la carga permanente,  $C_v$  la carga variable y  $F_c$  los factores de carga de acuerdo con las NTCDCC (2017),  $G_k$  la carga permanente,  $Q_k$  la carga variable,  $\gamma_G$  y  $\gamma_Q$  los factores de carga de acuerdo con los Eurocódigos,  $\psi_1 y \psi_2$  son factores de combinación igual a 0.5

#### 3.2.3.1.Combinaciones de carga

Las pilas de energía deben diseñarse de forma que su capacidad de carga reducida iguale o exceda el efecto combinado de todas las acciones que tengan una probabilidad de ocurrir simultáneamente. El diseño de este tipo de estructuras puede efectuarse utilizando las combinaciones y factores de carga propuestos en las NTCDCC (2017) para pilas tradicionales, considerando los cambios de temperatura como acciones variables (tal como se describe en el apartado 3.2.2.2). Así, el diseño de una pila de energía requiere definir la intensidad máxima del cambio de temperatura esperado en el elemento estructural. Los valores de intensidad máxima utilizando los factores de combinación propuestos por Rotta-Loria *et al.* (2020), de acuerdo con las equivalencias especificadas en la Tabla 3.3. Estos valores permiten representar la variabilidad del cambio de temperatura durante el tiempo de operación de las pilas de energía.

En esta tesis se evalúan únicamente combinaciones de carga que consideran acciones permanentes y variables. De esta forma, se considera que una pila de energía está sometida a tres tipos de acciones: 1) una carga mecánica permanente (carga muerta), 2) una carga mecánica variable (carga viva), y 3) una carga térmica variable (cambio de temperatura).

#### 3.2.4. Diseño estructural de pilas de energía

Las pilas de energía se deben diseñar para soportar las fuerzas trasmitidas por la superestructura que incluyen carga axial y momento flexionante. De acuerdo con lo anterior,

el dimensionamiento y revisión de estos elementos puede realizarse con base en los lineamientos establecidos para el diseño de columnas cortas. Estos elementos se caracterizan por estar sujetos principalmente a cargas de compresión, sin embargo, también soportan momentos flexionantes. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCDCEC-2017) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) de 2017 consideran dos categorías de estados límite: a) de falla, y b) de servicio.

El *estado límite de falla* se presenta con el agotamiento de la capacidad de carga de la estructura o de alguno de sus miembros. Para verificarlo, se deben calcular los elementos mecánicos de acuerdo con la combinación de acciones señalada en el capítulo 3.2.2.3, donde se toma en cuenta la temperatura. Posteriormente, se determina la resistencia nominal de la cimentación multiplicada por un factor de reducción y así se obtiene la resistencia de diseño. Finalmente, se verifica que la resistencia de la pila sea mayor que las cargas actuantes.

La condición de la capacidad límite resistente se representa por medio de un diagrama de interacción, el cual, se define como la representación gráfica de las combinaciones de carga axial y momento flexionante que una sección puede soportar (Figura 3.10). Estas combinaciones incluyen desde una carga axial máxima asociada a un momento nulo, hasta un momento máximo con carga axial nula y su construcción se realiza como sigue:

- a) **Punto A.** Representa la mayor carga de compresión axial pura que la cimentación puede soportar.
- b) **Punto B.** Indica el caso de una carga axial que actúa con una pequeña excentricidad produciendo un cambio en la distribución de la tensión. Sin embargo, la sección continúa trabajando por compresión y la falla ocurre por aplastamiento del concreto.
- c) **Punto C.** En esta zona la cimentación trabaja por tensión y compresión. La falla continúa ocurriendo por aplastamiento, ya que la tensión tomada por el acero aún no es suficiente para llegar al valor de fluencia.
- d) **Punto D.** La cimentación alcanza la falla balanceada, donde el concreto desarrolla su deformación máxima y el refuerzo alcanza su límite de fluencia. En este caso, la falla del concreto ocurre de forma simultánea con la fluencia del acero.
- e) **Punto E.** Indica la aplicación de una pequeña carga axial que actúa con una gran excentricidad. En esta zona de la gráfica, la falla ocurre por tensión ya que se excede el límite de fluencia.
- f) **Punto F.** Muestra la aplicación de momento sin carga axial. La falla ocurre como en el caso de una viga sujeta a momento flexionante.
- g) **Punto G.** Representa la mayor carga de tensión axial que la cimentación puede soportar.



Figura3.10. Diagrama de interacción para estructuras de concreto.

La sección propuesta debe cumplir los requisitos mínimos de refuerzo longitudinal y transversal definidos en las NTCDCEC-2017. Todas las barras longitudinales deben restringirse con estribos cuya separación (*s*) no debe ser mayor que:

$$s \le \begin{cases} 269/\sqrt{fy} \, d \\ 48 \, d \\ D/2 \end{cases} \tag{3.54}$$

donde d es el diámetro de la barra del estribo,  $f_y$  el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo y D el diámetro de la sección. Por otra parte, la cuantía del refuerzo longitudinal no debe ser menor que 1% ni mayor que 6%. Además, el número mínimo de barras es de seis en columnas circulares.

# 3.2.5. Metodología propuesta para el diseño geotécnico y estructural de pilas de energía

La metodología propuesta para diseñar una pila de energía requiere la interacción de los análisis geotécnico y estructural (Figura 3.11), ya que si no se consideran en conjunto se pueden exceder los estados límite produciendo mecanismos de colapso. A continuación, se enlistan las etapas sugeridas para el cálculo:

a) Definir la estratigrafía del sitio y las propiedades de los materiales.

- b) Proponer las dimensiones y el refuerzo longitudinal de la pila de energía.
- c) Calcular los elementos mecánicos y definir las combinaciones de acciones que se van a analizar.
- d) Realizar el cálculo del refuerzo transversal necesario para cumplir los requisitos estructurales.
- e) Determinar la capacidad de carga de la cimentación y obtener la resistencia de diseño con el diagrama de interacción
- f) Calcular los desplazamientos de la pila con el método de análisis elegido.
- g) Verificar que en cada caso los estados límite de falla y de servicio no sean excedidos de acuerdo con los límites permisibles definidos en las NTCDCC (2017).



Figura 3.11. Metodología propuesta para el diseño geotécnico y estructural de pilas de energía

# 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE PILAS DE ENERGÍA EN MÉXICO

#### 4.1. Introducción

En este capítulo se realiza el diseño geotécnico y estructural de una pila de energía que funciona como parte de la cimentación de una estructura ubicada en la Ciudad de México. La metodología empleada permite integrar los efectos térmicos a las recomendaciones de diseño convencionales. Es esencial que la cimentación admita los esfuerzos y deformaciones adicionales producidos por los cambios de temperatura al dimensionarse de acuerdo con los lineamientos establecidos por las NTCDCC de 2017.

Inicialmente, se describe el perfil estratigráfico y los parámetros de resistencia de los suelos. Con base en estos datos, se establecen las condiciones iniciales del modelo de transferencia de carga implementado en esta tesis. Posteriormente, se define la geometría de la pila de energía analizada y las combinaciones de carga a las que se encuentra sujeta. Al respecto, se detallan las diferentes casos de análisis y sus hipótesis.

En el siguiente apartado, se presenta la revisión geotécnica de la pila en consideración. Se calcula la capacidad de carga del elemento mediante la simulación de una prueba de carga. Para ello, se recurre al modelo de transferencia de carga programado en lenguaje Matlab ®. A continuación, se muestran los resultados de la distribución de cargas axiales y desplazamientos a lo largo de la pila. Finalmente, se evalúa si el diseño cumple con los estados límite de falla y servicio. Adicionalmente, se realiza el diseño estructural para

identificar los aspectos térmicos que pueden generar mecanismos de colapso y presenten una influencia directa en la resistencia de la cimentación.

### 4.2. Localización del caso de estudio

El sitio de estudio se ubica en Lomas de Santa Fe, al poniente de la Ciudad de México. De acuerdo con la Zonificación Geotécnica, se encuentra en la Zona I que se caracteriza por formaciones rocosas o suelos generalmente firmes depositados fuera del ambiente lacustre (NTCDCC, 2017). Se trata de un edificio de 52 niveles de superestructura y ocho niveles de sótanos, con un área de 4,333 m<sup>2</sup>.

La cimentación está conformada por veintiocho pilas de 1.0 m de diámetro, dos pilas de 1.5 m de diámetro, diecisiete pilas oblongas y un muro diafragma en la parte central del edificio. La longitud efectiva de las pilas es de 30 m. El nivel del piso terminado para el basamento se encuentra en la elevación 68.17 m y el desplante a 35.9 m de elevación. Cabe mencionar que la cimentación no se encuentra equipada con intercambiadores de calor, la pila señalada en la Figura 4.1 se propone hipotéticamente como pila de energía para fines de esta tesis.



Figura 4.1. Distribución de la cimentación (Rojas, 2016)

#### 4.3. Modelo geotécnico

#### 4.3.1. Estratigrafía del sitio

En la campaña de exploración, se realizaron dos sondeos mixtos a 50 m de profundidad, SM-01 (Figura 4.2) y SM-02, en los que se alternó la técnica de penetración estándar (SPT) y el muestreo inalterado mediante tubos dentados. La técnica de penetración estándar consistió en la recuperación de muestras inalteradas y en la medición del número de golpes N a cada 60 cm.



Figura 4.2. Perfil estratigráfico de la zona de estudio

A continuación, se describen de forma detallada la estratigrafía y las propiedades físicas del subsuelo producto del sondeo SM-01:

- Estrato A. Limo arcilloso. Relleno de 7.5 m de espesor, constituido principalmente por material de construcción, arenas poco compactas y arcillas de baja plasticidad. Tiene un contenido de agua natural promedio de 18-46% y número de golpes de 4-13.
- Estrato B. Arena media a gruesa. Debajo del relleno se encuentra la siguiente unidad geotécnica con 8.7 m de espesor conformada por arena media a gruesa color blanco con gravas empacadas. Presenta un contenido de agua natural promedio de 15.5% y un número de golpes mayor que 50. El porcentaje de gravas encontrado es de 37.1%, 38.3% de arena y 24.6% de finos.

- Estrato C. Arena fina a media. Enseguida se encuentra una capa de material con 7.80 m de espesor de color café grisáceo cuya distribución granulométrica consiste en 15.9% de grava, 46.4% de arena y 37.7% de finos. Su contenido de agua natural es de 19.6% y presenta un número de golpes mayor que 50.
- Estrato D. Limo arenoso. La siguiente unidad geotécnica tiene un espesor de 3.0 m y está constituida por limos arenosos color café de consistencia firme. El porcentaje de gravas identificado es de 2.8% de gravas, 44.9% de arenas, 52.3% de finos. Registra un contenido de agua natural de 31.4% y número de golpes mayor que 50.
- Estrato E. Arena media a gruesa. Posterior al Estrato D, se encuentra una capa de arenas finas a medias color café con intercalaciones de arena media color blanco con negro cuyo espesor es de 16.3 m. Su distribución granulométrica media es 25.7% de gravas, 49.4% de arenas, 25.0% de finos. Tiene un contenido de agua natural de 31.5% y número de golpes mayor que 50.
- Estrato F. Arena media con gravas. La última capa de material que se extiende hasta la profundidad del sondeo contiene arena media color café con presencia de gravas y boleos empacados del mismo material. Tiene un contenido de agua del 13.1% y un número de golpes mayor que 50. La granulometría consiste en 30.3% de grava, 41.6% de arena, 28.2% de finos.

A partir de los muestreos realizados, se detectó que no existía nivel de aguas freáticas hasta la profundidad máxima de exploración.

#### 4.3.2. Propiedades del suelo

Para determinar las características del suelo se ejecutaron pruebas triaxiales no consolidadas no drenadas UU y pruebas *in situ* con presiómetro de Menard y phicómetro. Las pruebas con presiómetro de Menard (PMT) se realizaron a cada 3 m, hasta 50 m de profundidad. En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros geotécnicos de cada estrato considerados en el modelo de transferencia de carga:

Estrato	Espesor (m)	φ (°)	c (kPa)	ץ (kN/m³)	$E_M$ (MPa)	qs (kPa)	q <sub>b</sub> (kPa)	αs	$\alpha_b$
1	5.00	38	29	17	150.00	47.62	-	0.8	4.8
2	5.00	41	43	20	126.63	113.77	-	0.8	4.8
3	6.00	32	514	20	133.10	155.49	-	0.8	4.8
4	6.00	38	84	20	163.95	165.66	-	2	11
5	6.00	42	304	20	186.02	145.50	-	0.8	4.8
6	2.00	41	467	20	294.00	141.25	31297.5	0.8	4.8

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas de los materiales empleadas en el análisis.

Nota:  $\varphi$  es el ángulo de fricción interna (°), *c* la cohesión del material (kPa),  $\gamma$  el peso volumétrico (kN/m<sup>3</sup>),  $E_M$  el módulo presiométrico de Menard (MPa),  $q_s$  la resistencia unitaria de la interfaz pilasuelo (kPa),  $q_b$  la resistencia unitaria en la punta (kPa),  $\alpha_b$  y  $\alpha_s$  son coeficientes asignados de acuerdo con la granulometría del suelo. Los valores del ángulo de fricción  $\phi$ , cohesión *c* y peso volumétrico  $\gamma$  se definieron de acuerdo con el estudio de mecánica de suelos realizado por Rojas (2016), mientras que el módulo presiométrico de Menard *E*<sub>M</sub> se tomó directamente de las pruebas de campo realizadas en el sitio (InGeum-2019). Los coeficientes  $\alpha_s$  y  $\alpha_b$  se asignaron considerando la granulometría de los materiales, para suelos cohesivos  $\alpha_s = 2$  y  $\alpha_b = 11$  y para suelos granulares  $\alpha_s = 0.8$  y  $\alpha_b = 4.8$  (Abchir, 2016).

Para calcular la resistencia cortante unitaria de la interfaz pila suelo  $q_s$ y la resistencia unitaria en la punta  $q_b$  se utilizaron las expresiones de las NTCDCC de 2017, descritas en el capítulo 3.2.2.4.

Adicionalmente, se realizaron pruebas experimentales *in situ* de las propiedades térmicas del suelo mediante el método transitorio de la aguja doble (Portillo, 2019). Se determinaron los parámetros de conductividad térmica  $\lambda$ , capacidad calorífica volumétrica  $C_{\nu}$  y difusividad térmica  $\alpha$  (Tabla 4.2).

Unidad de suelo	Conductividad térmica $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )			Capa volumét	cidad calo rica C <sub>v</sub> (M	Difus 0	Difusividad térmica α (mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )			
ut sutio	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	
RE	0.858	0.934	0.906	1.128	2.013	1.712	0.464	0.761	0.563	
AA	0.661	0.878	0.799	1.543	2.319	1.933	0.285	0.569	0.429	
TC	0.794	1.032	0.905	2.409	2.840	2.618	0.313	0.396	0.346	
GA	0.660	0.880	0.798	1.156	2.456	2.085	0.285	0.761	0.422	

Tabla 4.2. Propiedades térmicas del suelo de Santa Fe (modificada de Portillo, 2019).

Nota: Mín es el valor mínimo, Máx es el valor máximo, Prom el promedio, RE material de relleno, AA arenas azules compactadas, TC tobas café compactas y GA gravas pumíticas con arena.

#### 4.4. Descripción de la pila de energía analizada

#### 4.4.1. Dimensiones y propiedades del concreto

La pila de energía diseñada corresponde a un elemento de sección circular de 1.0 m de diámetro (D) y 30 m de longitud (L) que funciona como parte de la cimentación del edificio en estudio. En la Tabla 4.3 se muestran las propiedades de la estructura definidas para el análisis:

Tabla 4.3. Propiedades de la pila de energía empleadas en el modelo de transferencia de carga.

<i>L</i> (m)	<b>D</b> (m)	K <sub>h</sub> (GPa/m)	$\alpha_T (^{\circ}C^{-1})$	E (GPa)	
30	1.0	8.5	1.43x10 <sup>-5</sup>	17.50	

Nota: *L* es la longitud de la pila (m), *D* el diámetro (cm),  $K_h$  la rigidez impuesta en la cabeza de la cimentación (GPa/m),  $a_T$  el coeficiente de expansión térmica (°C<sup>-1</sup>) y *E* el módulo de Young del concreto (GPa)

El coeficiente de expansión térmica lineal  $\alpha_T$  se obtuvo con base en los valores reportados en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (2017). Para concreto se sugiere un valor de 1.43 x10<sup>-5</sup>/°C<sup>-1</sup>. La rigidez impuesta en la cabeza de la cimentación (*K<sub>h</sub>*) que representa la interacción pila-superestructura, se estimó con la fórmula presentada inicialmente por Goburnov *et al.* (1961) y retomada por Laloui *et al.* (2019) para el diseño de pilas de energía:

$$K_h = \frac{E_s \sqrt{B_{slab} L_{slab}}}{(1 - v_{suelo}^2)\rho_o}$$
(4.1)

donde  $E_s$  es el módulo de elasticidad promedio del suelo igual a 102.02 MPa,  $v_{suelo}$  es la relación de Poisson del suelo igual a 0.33 de acuerdo con Rojas (2016),  $B_{slab}$  y  $L_{slab}$  son el ancho y la longitud de la losa en contacto con la cabeza de la pila que fueron propuestas como 52.3 m y 66.7 m, respectivamente.  $\rho_o$  es un factor de desplazamiento que depende de la relación  $\chi = L_{slab}/B_{slab}$  y se determina de acuerdo con la Figura 4.3.



Figura 4.3. Relación entre la longitud y el factor de desplazamiento de una placa infinitamente rígida que descansa sobre un semiespacio elástico semi infinito (Laloui et al, 2019)

El módulo de Young del concreto E en MPa, se calculó con la fórmula descrita en las NTCDC (2017) para concretos clase 1 con agregado grueso basáltico, considerando una resistencia a compresión del concreto fc de 25 MPa:

$$E = 3500\sqrt{f'c} \tag{4.2}$$

#### 4.4.2. Cargas aplicadas

En este apartado se presentan las magnitudes de las acciones termo-mecánicas que se consideran en el diseño. La carga mecánica total factorizada ( $\Sigma QF_c$ ) a la que se encuentra sujeta la pila analizada, tiene un valor de 3,677.5 kN (Rojas, 2016). Se propone que el 70 % de la carga mecánica sea supuesta como acciones permanentes y el 30% como acciones variables (Rotta-Loria *et al.*, 2020).

La intensidad máxima del cambio de temperatura se definió con base en las recomendaciones de Rotta-Loria *et al.* (2020). De acuerdo con estos autores, los cambios de temperatura máximos típicos en pilas de energía varían entre -5 y -10 °C en etapa de enfriamiento y entre 10 y 20 °C en etapa de calentamiento. De esta forma, se propusieron valores de intensidad máxima para la pila de energía en estudio de  $\Delta_T = 10$  °C para calentamiento y  $\Delta_T = -5$  °C para enfriamiento. Las intensidades medias e instantáneas del cambio de temperatura se determinaron a partir de la intensidad máxima, utilizando los factores de combinación propuestos por Rotta-Loria *et al.* (2020), de acuerdo con las equivalencias especificadas en la Tabla 3.3.

Para obtener las cargas actuantes de diseño, todas las acciones verticales se multiplican por su correspondiente factor de carga (Fc). En la Tabla 4.4 se presenta el resumen de cargas aplicadas a la pila y los valores de diseño.

Estado	Tipos de	Acción		Intensidad				
límite	acciones			Máxima	Media	Instantánea		
	Permanente	Carga muerta, $C_p$ (kN)	1.3	1980	-	-		
		Carga viva, $Cv_{\nu}$ (kN)		735.5	367.7	367.7		
De falla	Variable	Carga de calentamiento, $Cv_c$ (°C)		10	5	5		
		Carga de enfriamiento, Cv <sub>e</sub> (°C)	1.5	-5	-2.5	-2.5		
	Permanente	Carga muerta, $C_p$ (kN)	1.0	1980	-	-		
De servicio		Carga viva, $Cv_{\nu}$ (kN)	1.0	735.5	367.7	367.7		
	Variable	Carga de calentamiento, $Cv_c$ (°C)		10	5	5		
		Carga de enfriamiento, Cve (°C)	1.0	-5	-2.5	-2.5		

Tabla 4.4. Resumen de cargas termo-mecánicas de diseño utilizadas en el modelo de transferencia de carga.

Con base en el apartado 3.2.3.1, se proponen las siguientes combinaciones de carga para evaluar el *estado límite de falla*:

• **Combinación 1.** Carga permanente, la carga viva como acción variable más desfavorable y la carga térmica de calentamiento como acción variable acompañante.
- **Combinación 2.** Carga permanente, la carga térmica de calentamiento como acción variable dominante y la carga viva como acción variable acompañante.
- **Combinación 3.** Carga permanente, la carga térmica de enfriamiento como acción variable más desfavorable y la carga viva como acción variable acompañante.

No se considera necesario evaluar el caso en que la carga viva corresponde a la acción variable más desfavorable y la carga térmica de enfriamiento representa la acción variable acompañante debido a que la reducción de temperatura contribuye a la capacidad de carga y es improbable que se excedan los estados límite de falla (Rotta-Loria *et al.*, 2020). Las combinaciones de carga propuestas para evaluar el *estado límite de servicio* son:

- **Combinación 4**. Carga permanente con intensidad máxima y las cargas viva y térmica de calentamiento con intensidad media.
- **Combinación 5.** Carga permanente con intensidad máxima y las cargas viva y térmica de enfriamiento con intensidad media.

En la Tabla 4.5 se muestran las diferentes magnitudes y combinaciones de cargas termomecánicas para los estados límite de falla y de servicio.

Combinación	Estado límite	$C_p$ (kN)	$Cv_{\nu}$ (kN)	$Cv_c$ (°C)	$Cv_e$ (°C)
1		2574	1103	7.5	-
2	Falla	2574	551.6	15	-
3		2574	551.6	-	-7.5
4	Samioio	1980	367.7	5	-
5	Servicio	1980	367.7	-	-2.5

Tabla 4.5. Resumen de combinaciones de carga para estados límite de falla y de servicio.

Nota: Donde *Cp* es la carga muerta (kN),  $Cv_v$  la carga viva (kN),  $Cv_c$  la carga variable de calentamiento (°C),  $Cv_e$  la carga variable de enfriamiento (°C)

### 4.5. Diseño geotécnico de la pila de energía

### 4.5.1. Estado límite de falla

El método de transferencia de carga implementado en esta tesis en lenguaje Matlab ® (Anexo II) permite conocer el aporte de la punta y del fuste, a la capacidad de carga de la pila de energía. Con este modelo se determinó la resistencia última de la cimentación, a partir de la simulación de una prueba de carga que consistió en aplicar diferentes niveles de acciones por ensayo y error hasta definir el mecanismo de falla. Burlon *et al* (2013) proponen que para pilas de energía se adopte el criterio de falla convencional, el cual establece que la capacidad de carga última se puede definir cuando la cimentación presenta un desplazamiento en la cabeza de 10% del diámetro del elemento.

En la Figura 4.4a se presenta la curva carga-desplazamiento para diferentes etapas de carga. El ensayo consistió en aplicar incrementos de carga de 4,000 kN hasta alcanzar un desplazamiento en la cabeza de aproximadamente 10 cm. Los resultados indican que la capacidad de carga de la pila (P) es igual a 24,000 kN. Considerando un factor de resistencia  $F_R$  de 0.35, se obtiene la capacidad de carga reducida (R) de 8,400 kN. La Figura 4.4b muestra la relación entre la carga axial desarrollada en la pila y el desplazamiento generado en la cabeza. Se observa que después de los primeros incrementos de carga la pila trabaja principalmente por punta, ya que el suelo circundante ha desarrollado toda su capacidad por fricción.



Figura 4.4. Curvas carga-desplazamiento en la cabeza de la pila: (a) Carga en la cabeza vs Desplazamiento en la cabeza y (b) Desplazamiento en la cabeza vs Carga axial

En la Figura 4.5 se presenta la distribución de los desplazamientos verticales a lo largo de la pila obtenidos en las distintas combinaciones de carga. En general, se aprecia que al aplicar un incremento de temperatura la pila se expande y, al disminuir la temperatura, el elemento se contrae. En consecuencia, en las combinaciones 1 y 2 los desplazamientos termomecánicos se reducen en la parte superior e incrementan en la punta. En la combinación 3 ocurre lo contrario, los desplazamientos termo-mecánicos crecen en la cabeza y se reducen con la profundidad. La magnitud de los desplazamientos termo-mecánicos es similar en las tres combinaciones de carga. Los máximos desplazamientos termo-mecánicos medidos en la cabeza de la pila para las combinaciones 1, 2 y 3 son 0.16, 0.11 y 0.16 cm respectivamente. La reducción en los desplazamientos de la combinación 2 es consecuencia de la aplicación de un incremento de temperatura mayor que contrarresta los desplazamientos mecánicos.



Figura 4.5. Desplazamiento vertical en la pila: (a) Combinación 1, (b) Combinación 2 y (c) Combinación 3

En la Figura 4.6 se examina la variación de la carga axial con la profundidad en las distintas combinaciones de cargas termo-mecánicas. De estos resultados se advierte que las restricciones en la punta y la cabeza del elemento tienen mayor influencia al calentar la pila que durante la contracción por enfriamiento. En la combinación 1 la carga termo-mecánica crece un 2.2% respecto a la carga mecánica y en la combinación 2, al estar sometida a un incremento de temperatura mayor ( $\Delta T=15^{\circ}$ C), la carga termo-mecánica aumenta hasta 38.5%. Al aplicar un incremento de temperatura la pila se expande y la parte superior se desplaza hacia arriba, mientras que la zona inferior se traslada en dirección opuesta (Figura 4.5). Así, la superestructura y el estrato de suelo rígido ubicado en la punta del elemento limitan este movimiento, generando cargas axiales adicionales. En la combinación 3 la carga termo-mecánica se reduce un 62.8% respecto a la carga mecánica debido a que la pila se contrae por la disminución de temperatura. La parte superior de la pila se desplaza hacia abajo y la punta se traslada hacia arriba generando fuerzas de tensión en la zona inferior del elemento. La localización del punto nulo NP para las combinaciones 1, 2 y 3 es 21.9, 19.3 y 5.5 m, respectivamente, el cual coincide con el punto de máxima carga térmica. Sin embargo, debido a la gran resistencia de la pila las cargas actuantes no exceden en ningún caso la capacidad de carga última.



Figura 4.6. Distribución de carga axial con la profundidad: (a) Combinación 1, (b) Combinación 2 y (c) Combinación 3

En la revisión por estado límite de falla, se debe verificar que las cargas actuantes sean menores a la capacidad de carga reducida para que la pila sea adecuada. Se define como capacidad de carga reducida R, a la capacidad de carga P afectada por un factor de resistencia  $F_R$  igual a 0.35. La Tabla 4.6 presenta los resultados obtenidos para cada combinación de carga propuesta. Como se aprecia, en los tres casos se cumple la desigualdad establecida por las NTCDCC-2017. Lo anterior concuerda con los valores reportados por Rotta-Loria *et al* (2020), donde las condiciones de equilibrio producidas por el efecto de la temperatura aseguran que no se desarrolla ningún mecanismo de colapso ante estado límite de falla.

Tabla 4.6. Revisión por estado límite de falla.

Estado límite de falla						
Combinación	Capacidad de carga reducida	( <b>kN</b> )	Carga actuante (kN)			
1	8,400	>	3753.0			
2	8,400	>	4551.3			
3	8,400	>	-1160			

#### 4.5.2. Estado límite de servicio

La Figura 4.7 muestra los desplazamientos verticales a lo largo de la pila bajo carga termomecánica. En la combinación 4 se observa que al calentar la pila, la sección ubicada sobre el punto nulo *NP* se desplaza hacia arriba y la parte inferior en dirección opuesta. Por lo tanto, el impacto de la temperatura sobre el *NP* disminuye y el movimiento térmico es contrarrestado por desplazamientos mecánicos. Estos resultados ilustran que es improbable que se excedan los estados límite de servicio bajo carga térmica de calentamiento. En la combinación 5 el elemento se contrae debido a la carga térmica de enfriamiento y la magnitud de los desplazamientos termo-mecánicos crece respecto a los desplazamientos mecánicos. El comportamiento anterior se debe a que los desplazamientos térmicos en la zona ubicada sobre el *NP* llevan la misma dirección que los desplazamientos generados por la carga mecánica. Los máximos desplazamientos termo-mecánicos medidos en la cabeza de la pila para las combinaciones 4 y 5 son 0.09 y 0.11 cm respectivamente.



Figura 4.7. Desplazamiento vertical en la pila: (a) Combinación 4 y (b) Combinación 5

La revisión por estado límite de servicio consiste en evaluar la distribución de desplazamientos verticales a lo largo de la pila de energía y compararlos con los límites permisibles especificados en las NTCDCC (2017). En la Tabla 4.7 se muestra el desplazamiento máximo medido en la cabeza del elemento al aplicar las combinaciones de carga 4 y 5. En términos generales, la condición más desfavorable se presenta al enfriar la pila. Con la reducción de temperatura, la zona superior del elemento de desplaza en la misma dirección que la carga mecánica incrementando la magnitud de los desplazamientos. Sin embargo, los resultados indican que en ningún caso el estado límite de servicio es excedido.

Estado límite de servicio				
Combinación	Desplazamiento vertical (cm)		Construcción aislada (cm)	Construcción colindante (cm)
4	0.09	<	5.0	2.5
5	0.11	<	5.0	2.5

Tabla 4.7. Revisión por estado límite de servicio (NTCDCC-2017).

#### 4.6. Diseño estructural de la pila de energía

En este apartado se verifica que el dimensionamiento y armado de la pila de energía sea capaz de soportar la carga axial transmitida por la superestructura. En primer lugar, se determina el área total de refuerzo longitudinal ( $A_s$ ) con la siguiente expresión:

$$A_s = \rho \cdot A_g \tag{4.3}$$

 $A_g$  es el área transversal de la pila y  $\rho$  la cuantía volumétrica de refuerzo longitudinal, que se considera de 1.12 % para este caso de estudio. Posteriormente, se obtiene la cantidad de varillas *n* necesaria para cumplir con el área de refuerzo longitudinal requerida:

$$n = \frac{A_s}{a_s} \tag{4.4}$$

Donde  $a_s$  es el área transversal de la varilla empleada en el cálculo. En la primera iteración de diseño, se propuso una varilla del número 10 (d=3.18 cm) y estribos del número 4 (d=1.27 cm). El esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo  $f_y$  se definió con un valor de 412 MPa. Con estos datos, se verificó el cumplimiento de la separación máxima s de acuerdo con las condiciones definidas en el apartado 3.2.4. El resumen de datos y resultados se presenta en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Resultados de cálculo de refuerzo longitudinal y transversal

$A_g$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	Varilla No.	$a_s$ (cm <sup>2</sup> )	n	s (cm)
7854	94.25	10	7.94	12	16.5

Nota:  $A_g$  es el área transversal de la pila (cm<sup>2</sup>),  $A_s$  el área total de refuerzo longitudinal (cm<sup>2</sup>) y  $a_s$  el área transversal de la varilla empleada (cm<sup>2</sup>), *s* es la separación máxima entre los estribos (cm),  $f_y$  es el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

El diagrama de interacción empleado para verificar que la resistencia de la pila propuesta es mayor que las cargas actuantes, se realizó con el programa Response-2000 ® (Bentz *et al*, 2001). Al ingresar las características de geometría y armado de la estructura, el software

genera las combinaciones de carga-momento que la sección puede soportar (Figura 4.8). Las cargas actuantes corresponden a las combinaciones de acciones definidas en el Capítulo 4.3.2. Las combinaciones 1 y 2, con las cuales se analiza el impacto de la carga mecánica y la carga térmica de calentamiento, se ubican en la zona de compresión y es improbable que excedan la resistencia de diseño. Con la combinación 3 se revisa la seguridad de la pila cuando la carga mecánica y la carga térmica de enfriamiento actúan simultáneamente. Es importante verificar este tipo de respuesta durante el diseño estructural, ya que el enfriamiento genera tensiones que el concreto por sí solo no podría soportar. Finalmente, los resultados indican que la sección transversal de la pila y el armado propuesto deben incrementarse. Se requiere refuerzo longitudinal adicional en la zona inferior de la pila donde se generan fuerzas de tensión mayores.



Figura 4.8. Diagrama de interacción obtenido con el programa Response-2000 ®.

# 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis fue realizar el diseño geotécnico y estructural de una pila de energía mediante la implementación de un algoritmo numérico fundamentado en curvas de transferencia de carga, utilizando datos experimentales para su calibración. Con este fin, después de una breve introducción al tema dada en el Capítulo 1, en el Capítulo 2 se describieron los elementos que conforman una cimentación a base de pilas de energía, así como, los parámetros geotécnicos y estructurales que inciden en mayor medida en su comportamiento. Además, se presentó un resumen de la revisión bibliográfica realizada sobre pruebas de carga *in situ* y modelos en centrífuga ejecutados con pilas de energía. Se mostró que la expansión y contracción térmica inducen cambios significativos en la interfaz pila-suelo que necesitan ser estudiados a detalle. Por otra parte, se analizó la respuesta de las pilas de energía bajo cargas térmicas y termo-mecánicas, especialmente el caso de un elemento trabajando por fricción y otro por punta. Lo anterior evidenció que las restricciones impuestas a la pila producen esfuerzos y deformaciones adicionales al comportamiento mecánico, los cuales, deben considerarse en el diseño.

En el Capítulo 3 se expusieron diversos métodos de análisis del estado actual de conocimiento, para estimar la influencia de la temperatura en la respuesta mecánica de las pilas de energía. Inicialmente, se describieron las principales hipótesis de estos métodos y algunos ejemplos de aplicación publicados en la literatura universal. En la parte principal de este capítulo se presentó el modelo de transferencia de carga empleado en esta tesis para

calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en pilas de energía. Se eligió este método por ser práctico y eficiente para identificar la influencia de las cargas térmicas en la estructura, bajo distintas condiciones de trabajo. Posteriormente, se describió el procedimiento de cálculo para el diseño de una pila de energía de acuerdo con los criterios descritos en los Eurocódigos. Enseguida, se expuso de forma detallada la adaptación propuesta de las recomendaciones para diseño de pilas de energía con base en los Eurocódigos a las NTCDCC (2017) de México.

En el Capítulo 4 se implementó el modelo de transferencia de carga propuesto en esta tesis para realizar el diseño geotécnico y estructural del caso práctico-hipotético de una pila de energía construida en la Ciudad de México. Se efectuó la revisión de los estados límite de falla y de servicio con distintas combinaciones de acciones termo-mecánicas, modificando la intensidad de la carga viva, la carga térmica de calentamiento y la carga térmica de enfriamiento. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los análisis mencionados anteriormente.

### Sobre los métodos de diseño para pilas de energía:

• Se comprobó que el algoritmo de cálculo *EPiles* implementado en esta tesis es capaz de representar los efectos del cambio de temperatura en el comportamiento mecánico de una cimentación a base de pilas de energía. El programa *EPiles* propuesto en este trabajo representa una herramienta útil para cimentar las bases para el diseño de pilas de energía en México.

### Sobre el diseño geotécnico para la revisión por estado límite de falla:

- Se comprobó que las condiciones de equilibrio producidas por los cambios temperatura en el caso de estudio aquí analizado, aseguran que no se logre ningún mecanismo de colapso ante estado límite de falla. Dicho comportamiento se debe a la localización del punto nulo, que se desplaza hacia la cabeza o el pie de la pila, para compensar las reacciones del suelo sobre y por debajo de esta zona.
- Se identificó que las restricciones impuestas por la superestructura y el suelo tienen mayor influencia al calentar la pila que durante la contracción por enfriamiento. Esta condición debe tomarse en cuenta durante el diseño de la pila de energía, ya que se generan cargas axiales adicionales que pueden resultar desfavorables.
- Se demostró que la carga térmica de calentamiento es la acción predominante en las distintas combinaciones de carga analizadas. En este caso, los estados límite de falla no son excedidos y la revisión puede considerarse como un proceso convencional de cálculo.

### Sobre el diseño geotécnico para la revisión por estado límite de servicio:

• Se demostró que, al aplicar una carga térmica de enfriamiento, la magnitud de los desplazamientos termo-mecánicos cerca de la cabeza aumenta, ya que llevan la

misma dirección que los desplazamientos generados por la carga mecánica. Sin embargo, los estados límite de servicio no son excedidos.

• Se demostró que, al incrementar la temperatura, la magnitud de los desplazamientos térmicos disminuye. Este comportamiento se debe a que la parte superior de la pila se traslada en dirección opuesta al movimiento generado por la carga mecánica, evitando asentamientos excesivos.

### Sobre el diseño estructural para la revisión por estado límite de falla:

- Se comprobó que las fuerzas de compresión generadas por la carga térmica de calentamiento no exceden la resistencia de diseño, por lo tanto, la sección de la pila de energía propuesta cumple los requisitos estructurales.
- Se demostró que la carga térmica de enfriamiento genera fuerzas de tensión que pueden resultar desfavorables para la pila de energía. En este caso, es recomendable incrementar el refuerzo longitudinal para que proporcione suficiente resistencia para cumplir con este tipo de solicitaciones.

### 5.2. Recomendaciones

El modelo de transferencia de carga implementado en esta tesis, a través del código *EPiles* se desarrolló principalmente para verificar los estados límite de falla y de servicio en una pila de energía sujeta a cargas estáticas. Por lo anterior, resulta importante realizar investigaciones adicionales que tomen en cuenta lo siguiente:

- Estudiar diferentes tipos de curvas *t*-*z* para identificar aquéllas que representan mejor el comportamiento del suelo de la Ciudad de México.
- Calibrar el código desarrollado en Matlab ® propuesto en esta tesis con parámetros obtenidos de pruebas de carga *in situ* en pilas de energía construidas en la Ciudad de México.
- Desarrollar un algoritmo numérico que considere la degradación en la interfaz pilasuelo al aplicar cargas térmicas cíclicas.
- Calcular la magnitud de las interacciones que pueden desarrollarse entre grupos de pilas de energía para definir el comportamiento global de la estructura.
- Estudiar los efectos de distintas cargas térmicas de enfriamiento en la resistencia estructural de la cimentación, para identificar las condiciones más desfavorables que pueden generar mecanismos de colapso.
- Incorporar los momentos actuantes a las combinaciones de carga analizadas durante la revisión estructural por estados límite de falla.

# REFERENCIAS

Abchir, Z., Burlon, S., Frank, R., Habert, J., & Legrand, S. (2016). T–z curves for piles from pressuremeter test results. *Géotechnique*, 66(2), 137-148.

Abuel-Naga, H., Raouf, M. I. N., & Nasser, A. G. (2015). Energy piles: current state of knowledge and design challenges. *Environmental Geotechnics*, 2(4), 195-210.

Akrouch, G., Sanchez, M., & Briaud, J.-L. (2014). Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays. *Acta Geotechnica*, 9(3), 399–412.

Alnefaie, K. A., & Abu-Hamdeh, N. H. (2013). Specific heat and volumetric heat capacity of some saudian soils as affected by moisture and density. *International conference on mechanics, fluids, heat, elasticity and electromagnetic fields* (pp. 139-143).

Amatya, B.L., Soga, K., Bourne-Webb, P., Amis, T., & Laloui, L. (2012). Thermomechanical behaviour of energy piles. *Géotechnique*, 62(6): 503–519.

Antics, M., Bertani, R., & Sanner, B. (2016). Summary of EGC 2016 Country update reports on geothermal energy in Europe. *Proceedings of European Geo- thermal Conference (EGC 2016)*, Pisa, Italy, European Geothermal Energy Council.

Armaleh, S., & Desai, C. S. (1987). Load-deformation response of axially loaded piles. *Journal of geotechnical engineering*, *113*(12), 1483-1500.

Barba, D.F. (2018). Estudio del comportamiento de estructuras termoactivas, con énfasis en pilas de energía. *Tesis de maestría en la Universidad Nacional Autónoma de México*.

Bentz, E., & Collins, M. P. (2001). Response 2000 User Manual, version 1.1. Dept. of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.

Bochon, A. (1992). Les mesures de déformation des structures hyperstatiques: le témoin sonore. *Revue française de géotechnique*, 60: 41-50.

Bodas Freitas, T., Cruz Silva, F., & Bourne-Webb, P. (2013). The response of energy foundations under thermo-mechanical loading. *Proceedings of 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering* (Vol. 4, pp. 3347-3350). Paris, France: Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique.

Boënnec, O. (2009). Piling on the Energy. Geodrilling International, March 2009: 25-28.

Bond, A., & Harris, A. (2008). Decoding eurocode 7. CRC Press.

Bourne-Webb, P., Amatya, B. L., & Soga, K. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique* 59(3): 237–248.

Bourne-Webb, P. J., Soga, K., & Amatya, B. (2013). A framework for understanding energy pile behaviour. *Geotechnical Engineering*, 166(GE2), 170-177.

Bourne-Webb, P., Burlon, S., Javed, S., Kürten, S., & Loveridge, F. (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 402-419.

Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81-122.

Brandl, H. (2013). Thermo-active ground-source structures for heating and cooling. *Procedia Engineering*, 57, 9-18.

Burlon, S., Habert, J., Szymkievicz, F., Suryatriyastuti, M., & Mroueh, H. (2013). Towards a design approach of bearing capacity of thermo-active piles. European Geothermal Congress (pp. 1-6).

Chen, D., & McCartney, J. S. (2016). Parameters for load transfer analysis of energy piles in uniform nonplastic soils. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 04016159.

Coyle, H. M., & Reese, L. C. (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 92(2), 1-26.

Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., ... & Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758.

Di Donna, A., Dupray, F., & Laloui, L. (2013). Numerical study of the heating-cooling effects on the geotechnical behaviour of energy piles. *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics–Manassero et al (Eds)*, 475-482.

Di Donna, A., Ferrari, A., & Laloui, L. (2016). Experimental investigation of the soil concrete interface: Physical mechanisms, cyclic mobilization and behavior at different temperaturas. *Canadian Geotechnical Journal*, 53 (4): 659–672.

Dupray, F., Laloui, L. and Kazangba, A. 2014. Numerical analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation. *Computers and Geotechnics*, 55, pp. 67–77.

Frank, R., and Zhao, S. R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussees*, 119, 17–24.

Fuentes, R., Pinyol, N., & Alonso, E. (2016). Effect of temperatura induced excess porewater pressures on the shaft bearing capacity of geothermal piles. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 8, 30–37.

Gao, J., Zhang, X., Liu, J. Li, X.L. & Yang, J. (2008). Thermal performance and ground heat temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 28, 2295-2304.

Goode, J.C., & McCartney, J.S. (2015). Centrifuge modeling of end-restraint effects in energy foundations. *Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 141(8), 04015034

Gorbunov-Posadov, M. I., & Serebrjanyi, R. V. (1961). Design of structures on elastic foundations. *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, París, Francia, vol. 1, pp. 643–648.

Gulvanessian, H. (2001). EN1990 Eurocode-Basis of structural design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering* (Vol. 144, No. 6, pp. 8-13).

Hirayama, H. (1990). Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions. *Soils and Foundations*, 30(1), 55–64.

Johnston, I.W., Narsilio, G.A., Colls, S. (2011) Emerging Geothermal Energy Technologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 643-653

Knellwolf, C., Peron, H., & Laloui, L. (2011). Geotechnical analysis of heat exchanger piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 890-902.

Ko, H.Y., (1988). Summary of the state-of-the-art in centrifuge model testing. *Centrifuge in Soil Mechanics*, 11–28.

LAFARGE (2013) Pilotes geotérmicos. 1.1.2 Cimentaciones. *Efficient Building with LAFARGE*, España.

Laloui, L., Moreni, M., & Vulliet, L. (2003). Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et e'changeur de chaleur. *Canadian Geotechnical Journal*; 40(2):388–402.

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

Laloui, L., & François, B. (2009). ACMEG-T: Soil Thermoplasticity Model. *Journal of Engineering Mechanics*, 135(9), 932-944.

Laloui, L., & Di Donna, A. (2011). Understanding the behaviour of energy geo-structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering* (Vol. 164, No. 4, pp. 184-191).

Laloui L, & Di Donna A. (2013). Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering. John Wiley & Sons, New Jersey, NY, USA.

Laloui, L., & Loria, A. F. R. (2019). Analysis and Design of Energy Geostructures: *Theoretical Essentials and Practical Application*. Academic Press.

Li, R., Zhao, L., Wu, T., Wang, Q., Ding, Y., Yao, J., ...& Zhu, X. (2019). Soil thermal conductivity and its influencing factors at the Tanggula permafrost region on the Qinghai–Tibet Plateau. *Agricultural and forest meteorology*, 264, 235-246.

López-Acosta N. P., Barba D. F. & Sánchez M. (2017). Pilas de energía. Uso directo de la energía geotérmica a través de las cimentaciones profundas. Proceedings of the 4th International Conference on Deep Foundations (4th ICDF). (SMIG, TC-214 ISSMGE, DFI, G-I ASCE) November 15-16, 2017, Mexico City, Mexico, 149-161.

Loveridge, F. A., Powrie, W., Amis, T., Wischy, M., & Kiauk, J. (2016). Long term monitoring of CFA energy pile schemes in the UK. *Energy Geotechnics* (pp. 585-592). CRC Press.

Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.

McCartney, J. S., & Rosenberg, J. E. (2011). Impact of heat exchange on side shear in thermo-active foundations. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 488-498).

Mimouni, T., & Laloui, L. (2015). Behaviour of a group of energy piles. *Canadian Geotechnical Journal*. 52(12):1913–1929.

Murphy, K. D., McCartney, J. S., & Henry, K. S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10(2), 179-195.

Ng, C. W. W., Shi, C., Gunawan, A., Laloui, L., & Liu, H. L. (2015). Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 1–13.

Ouyang, Y., Soga, K., & Leung, Y. F. (2011). Numerical back-analysis of energy pile test at Lambeth College, London. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 440-449).

Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G. and Senol, A. (2014). 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers. *Geothermics*, *51*, 312–324.

Park, S., Lee, D., Choi, H. J., Jung, K., & Choi, H. (2015). Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger). *Energy*, 81, 56-66.

Pasten, C., & Santamarina, J. C. (2014). Thermally induced long-term displacement of thermoactive piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5), 06014003.

Peron, H., Knellwolf, C., & Laloui, L. (2011). A method for the geotechnical design of heat exchanger piles. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 470-479).

Plaseied, N. (2012). Load transfer analysis of energy foundations. M.S.thesis, Univ. of Colorado Boulder, Boulder, CO.

Portillo, D. M., López-Acosta, N. P., & Barba, D. F. (2019). Thermal Properties of Mexico Basin Soils. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges: Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE)*, 17-20 November 2019, Cancún, México.

Poulos, H. G., & E. H. Davis. 1980. Pile foundation analysis and design: Series in geotechnical engineering. New York: Wiley.

Reese, L., Wang, S.T., Isenhower, B. & Arrelanga, J. (2004). L-Pile Plus Ver. 5: An analysis of Piles and Drilled Shafts under Lateral Loads. *Ensoft, Inc.* Austin Tx.

Riederer, P., Evars, G., Gourmez, D., Jaudin, F., Monnot, P., Partenay, V., et al. (2007). Conception de Fondations Geothermiques - Rapport Final. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment: Sophia-Antipolis.

Rojas, J. (2016). Comunicación personal.

Rotta Loria, A.F., Laloui, L. (2016). Thermally induced group effects among energy piles. *Géotechnique*; 67(5):374–393.

Rotta Loria, A. F., Gunawan, A., Shi, C., Laloui, L., and Ng, C. W. W. (2015). Numerical modelling of energy piles in saturated sand subjected to thermo-mechanical loads. *Geomechanics for Energy and Environment*, 1, 1-15.

Rotta-Loria, A. F. (2018). Performance-based Design of Energy Pile Foundations. DFI Journal - The Journal of the Deep Foundations Institute, 12(2), 94-107.

Rotta-Loria, A. F., Bocco, M., Garbellini, C., Muttoni, A., & Laloui, L. (2020). The role of thermal loads in the performance-based design of energy piles. *Geomechanics for Energy and the Environment*, *21*, 100153.

Ryozo, O. (2006). Development of a ground source heat pump system with Ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundations of a building. In *8th IEA Pump Conference*.

Seed, H. B., and Reese, L. C. (1957). The action of soft clay along friction piles. *American Society of Civil Engineers Transactions*, 122, 731–754

SIA (Société suisse des ingénieurs et des architectes) (2005). Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. *Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance*. Zurich, Suiza.

Silvani, C., Nuth, M., Laloui, L., & Peron, H. (2009). Understanding the thermomechanical response of heat exchanger piles. *Proc. First Int. Symposium on Computational Geomechanics (COMGEO I)*, 589-596.

Soga, K., & Rui, Y. (2016). Energy geostructures. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* (pp. 185-221). Woodhead Publishing.

Stewart, M.A., & McCartney, J.S. (2014). Centrifuge modeling of soil-structure interaction in energy foundations. *Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering*; 140(4), 04013044.

Suryatriyastuti, M. E., Mroueh, H., & Burlon, S. (2012). Understanding the temperatureinduced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3344-3354.

Suryatriyastuti, M. E., Mroueh, H., & Burlon, S. (2014). A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles. *Computers and Geotechnics*, 55, 378-391.

Sutman, M. (2016). Thermo-Mechanical Behavior of Energy Piles: Full-Scale Field Testing and Numerical Modeling. *Doctoral thesis in Virginia Tech*.

Taylor, R. E. (1995). Geotechnical Centrifuge Technology. *Blackie Academic & Professional*, 296 p.

TERRASOL. (2009). Software User's Manual, Programme FoXta Partie F: Module Taspie. Disponible en: http://www.terrasol.com/Softwares/Foxta/manuels/FoXta-PartieF v2.0.pdf.

Tomlinson, M. J. (1957). The adhesion of piles in clay soils. Proc., Fourth Intern. *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2, 66-71.

Tomlinson, M., and Woodward, J. (2008). Pile design and construction practice, Taylor & Francis, Canada

Wang, B., Bouazza, A., Singh, R. M., Haberfield, C., Barry-Macaulay, D., & Baycan, S. (2015). Posttemperature effects on shaft capacity of a fullscale geothermal energy pile. *Journal of Geotechnical and. Geoenvironmental. Engineering*, 141 (4): 04014125

Wang, C. L., Liu, H. L., Kong, G. Q., Ng, C. W., & Wu, D. (2016). Model tests of energy piles with and without a vertical load. *Environmental Geotechnics*, 3(4), 203-213.

Wierenga, P. J., Nielsen, D. R., & Hagan, R. M. (1969). Thermal properties of a soil based upon field and laboratory measurements. *Soil science society of America Journal*, 33(3), 354-360.

# ANEXO I. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CARGA PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS TERMO-MECÁNICO

El método de análisis descrito en el apartado 3.1.2 se programó en una rutina de Matlab  $\mathbb{R}$  (*EPiles*) y fue validado utilizando datos experimentales de esfuerzos y deformaciones medidos en pruebas de carga en pilas publicados en la literatura internacional. A continuación, se presentan los cuatro casos de estudio analizados: a) Foxta v3 $\mathbb{R}$ , b) Lambeth College, c) Escuela Politécnica Federal de Lausana y d) Knellwolf *et al.* (2011).

# I.1. Caso A. Foxta v3

El módulo Taspie+ del software Foxta v3® se utiliza para simular el comportamiento de cimentaciones profundas bajo carga mecánica axial. Se fundamenta en las funciones de transferencia de carga de Frank y Zhao (1982). Con el objetivo de evaluar la parte mecánica del algoritmo implementado en esta tesis, se compararon los resultados aquí obtenidos con el programa desarrollado en Matlab® con un ejemplo publicado en el manual de usuario del software.

# I.1.1. Estratigrafía del sitio

Las condiciones del subsuelo se definieron a partir del perfil propuesto por TERRASOL (2009). La estratigrafía se conforma por una capa de arcilla arenosa con 4.0 m de espesor, un estrato de arena arcillosa con 6.0 m de espesor y un depósito de arena densa con 2.0 m de espesor.

#### I.1.2. Geometría y propiedades de los materiales

Para la metodología empleada en este estudio las características del concreto son constantes a lo largo de toda la pila. La pila consiste en un elemento de concreto de 12.0 m de longitud y un diámetro de 0.6 m con un módulo de elasticidad (*Epile*) de  $1.0E^{07}$  kPa. En la Tabla I.1 se presentan las propiedades mecánicas de los materiales

Tabla I.1. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la calibración del caso Foxta v3®

Estrato	qs (kPa)	$q_b$ (kPa)	$\alpha_s$	$\alpha_b$	$E_M$ (kPa)
Arcilla arenosa	20	-	2	11	5000
Arena arcillosa	50	-	0.8	4.8	8000
Arena densa	120	2500	0.8	4.8	20000

Nota:  $E_M$  es el módulo presiométrico de Menard (kPa),  $q_s$  la resistencia unitaria de la interfaz pila-suelo (kPa),  $q_b$  la resistencia unitaria en la punta (kPa),  $\alpha_b$  y  $\alpha_s$  son coeficientes asignados de acuerdo con la granulometría del suelo.

Es importante definir el tipo de suelo en cada estrato ya que a partir de ello se establecen los coeficientes  $\alpha_s$  y  $\alpha_b$ , con los que se determina la pendiente inicial de las funciones de transferencia de carga.

### I.1.3. Análisis de resultados

La Figura I.1a muestra el perfil de la carga axial movilizada, al aplicar una carga mecánica (*P*) de 1000 kN. La línea continua corresponde al modelo implementado en Matlab® en esta tesis y los puntos indican los valores obtenidos con Foxta v3®. Se observa como la fuerza axial decrece con la profundidad debido a la resistencia a la fricción desarrollada a lo largo de la cimentación, lo que corresponde al comportamiento típico de estos elementos. La Figura I.1b ilustra cómo los esfuerzos verticales resultan mayores en la cabeza de la pila, debido a que en esta zona la estructura tiene mayores desplazamientos y van disminuyendo con la profundidad. En general, el ajuste presenta una buena estimación del comportamiento mecánico de la pila en términos de cargas y esfuerzos axiales.



Figura I.1. Comparación de resultados obtenidos en caso Foxta: (a) Fuerza axial movilizada y (b) Esfuerzos verticales en la pila

# I.2. Caso B. Lambeth College, Reino Unido

Para la calibración termo-mecánica se utilizaron datos de la prueba de carga *in situ* ejecutada por Bourne-Webb *et al.* (2009) en un edificio del Lambeth College, Reino Unido. La pila de energía se encuentra instalada en la formación arcillosa de Londres, por lo que se considera que la cimentación trabaja principalmente por fricción.

# I.2.1. Estratigrafía del sitio

La estratigrafía está constituida por un depósito de arena y grava con un espesor de 6.5 m, que debido a su baja rigidez se considera en el diseño. Por debajo de éste, se encuentra un estrato de arcilla limosa con un espesor de 60 m. Con base en los resultados experimentales, la capa de arcilla presenta diferentes parámetros conforme aumenta la profundidad, como se muestra en la Tabla I.2.

### I.2.2. Geometría y propiedades de los materiales

La pila de concreto tiene 16 m de longitud (restando 6.5 m del estrato que no se consideró en el cálculo) y 0.6 m de diámetro. Se supuso un módulo de elasticidad igual a 40 GPa y un coeficiente de expansión térmica de  $-8.5 \times 10^{-6\circ}C^{-1}$  (Bourne-Webb *et al.*,2009). Para definir el módulo de Menard del suelo se utilizaron valores típicos de la arcilla de Londres de

acuerdo con Knellwolf *et al.* (2011). En la Tabla I.2 se muestran los parámetros térmicos y mecánicos utilizados en la calibración.

Tabla I.2. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la calibración del caso de Lambeth College.

Estrato	Espesor (m)	$q_s$ (kPa)	$q_b$ (kPa)	$\alpha_s$	$\alpha_b$	$E_M$ (kPa)
Suelo granular	6.5	-	-	-	-	-
Arcilla 1	4.0	60		2	11	45000
Arcilla 2	6.0	70	-	2	11	45000
Arcilla 3	6.0	80	460	2	11	45000

Nota:  $E_M$  es el módulo presiométrico de Menard (kPa),  $q_s$  la resistencia unitaria de la interfaz pila-suelo (kPa),  $q_b$  la resistencia unitaria en la punta (kPa),  $\alpha_b$  y  $\alpha_s$  son coeficientes asignados de acuerdo con la granulometría del suelo.

#### I.2.3. Condiciones iniciales y análisis de resultados

Para el cálculo térmico es necesario considerar la rigidez de las condiciones de frontera, en este caso la pila se encuentra restringida por un marco de carga ubicado en la cabeza del elemento y por el depósito granular que se encuentra en el estrato superior. Con base en lo propuesto por Knellwolf *et al.* (2011), se utilizó un valor de la rigidez en la cabeza de la cimentación (*Kh*) igual a 10 GPa/m para la fase de calentamiento. En la Figura I.2 se presentan los resultados de las fuerzas axiales y deformaciones obtenidas durante la etapa mecánica de análisis al aplicar una carga de 1200 kN. Al igual que en el caso anterior, la distribución de la fuerza axial decrece linealmente con la profundidad ya que la carga se está aplicando en la cabeza de la pila. En el caso de las deformaciones, se observa que la tendencia es similar a los datos experimentales. Sin embargo, al no considerar el estrato superior, el perfil calculado con curvas de transferencia de carga disminuye respecto a los valores obtenidos con la prueba de carga (*in situ*).

La Figura I.3 muestra la fuerza axial termo-mecánica y la resistencia a la fricción movilizada durante la etapa de calentamiento. Al aplicar el incremento de temperatura ( $\Delta T$ =10°C), la sección inferior de la pila se mueve hacia abajo ocasionando que la magnitud de la fricción en esta zona aumente. Contrariamente, en la parte superior de la cimentación la fricción disminuye a medida que el elemento se desplaza hacia arriba ya que actúa en dirección opuesta al movimiento de la carga mecánica. Además, al considerar que la pila trabaja principalmente por fricción, las fuerzas axiales son mayores en la cabeza de la pila y menores en la base. Dicho comportamiento se debe a que no se encuentra ninguna restricción en el fondo que impida el movimiento de la cimentación y genere fuerzas adicionales.



Figura I.2. Comparación de resultados obtenidos en caso Lambeth College: (a) Fuerza axial y (b) Deformaciones en la pila



Figura I.3. Comparación de resultados obtenidos en caso Lambeth College: (a) Fuerza axial movilizada y (b) Resistencia a la fricción en la pila

La principal diferencia entre los datos experimentales y los calculados con el programa aquí implementado se encuentra en la parte superior de la cimentación, que es donde se presenta el cambio entre el depósito granular y el cohesivo. No obstante, se distingue un buen ajuste en la calibración térmica y mecánica.

### I.3. Caso C. Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza (EPFL)

En esta calibración se emplearon los datos de la prueba de carga *in situ* llevada a cabo por Laloui *et al.* (2006) en una pila de energía que funciona como parte de la cimentación de un edificio de cuatro pisos en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza (EPFL). Se instalaron tubos de polietileno en la estructura con una configuración tipo U simple para el paso del fluido intercambiador de calor. Se colocaron extensómetros para medir las deformaciones verticales y radiales, sensores de temperatura y una celda de carga para obtener la carga en el fondo de la pila.

### I.3.1. Estratigrafía del sitio

La estratigrafía está constituida por un suelo aluvial con espesor de 12 m, un suelo arenoso con espesor de 10 m, un estrato de morrena de fondo con espesor de 3 m y por debajo de éste se encuentra una capa de arenisca con un espesor de 1 m.

### I.3.2. Geometría y propiedades de los materiales

La pila de concreto tiene 26 m de longitud y 0.88 m de diámetro. Se consideró un módulo de elasticidad igual a 29.2 GPa y un coeficiente de expansión térmica de  $-1.0 \times 10^{-5}$ °C<sup>-1</sup> (Laloui *et al.*, 2006). Los parámetros geotécnicos del suelo se definieron con base en diversas investigaciones geotécnicas y dos pruebas de carga *in situ*. En la Tabla I.3 se presentan los parámetros térmicos y mecánicos utilizados en la calibración.

Estrato	Espesor (m)	qs (kPa)	$q_b$ (kPa)	$\alpha_s$	$\alpha_b$	$E_M$ (kPa)
Suelo Aluvial 1	5.5	102	-	2	11	7348
Suelo Aluvial 2	6.5	70.8	-	2	11	4752
Suelo Arenoso	10.0	74.7	-	2	11	8008
Morrena de fondo	3.0	160	-	2	11	53416
Arenisca	1.0	300	11000	2	11	53416

Tabla I.3. Propiedades mecánicas de los materiales utilizadas para la calibración del caso EPFL.

Nota:  $E_M$  es el módulo presiométrico de Menard (kPa),  $q_s$  la resistencia unitaria de la interfaz pila-suelo (kPa),  $q_b$  la resistencia unitaria en la punta (kPa),  $\alpha_b$  y  $\alpha_s$  son coeficientes asignados de acuerdo con la granulometría del suelo.

#### I.3.3. Condiciones iniciales y análisis de resultados

El análisis térmico se realizó considerando la etapa constructiva *T1* en la cual la pila no tiene ninguna restricción y sólo se aplica un incremento de temperatura  $\Delta T$ =14.3 °C. El análisis termo-mecánico se efectuó considerando la etapa constructiva *T7* en la que el edificio se encuentra totalmente construido. Por lo tanto, es necesario considerar la rigidez de la superestructura (*K<sub>h</sub>*). Knellwolf *et al.* (2011) proponen un valor *K<sub>h</sub>* igual a 2 GPa/m. En la Figura I.4a se presenta la distribución de las fuerzas axiales durante la etapa *T7* al aplicar una carga *P* de 1000 kN. Como resultado de las restricciones impuestas por el edificio y el estrato de suelo rígido ubicado en la punta la magnitud de la carga termo-mecánica incrementa en ambas zonas. En la Figura I.4b se muestra el perfil de deformaciones termo-mecánicas durante la etapa *T1*. Las deformaciones son mayores en la cabeza de la pila ya que el elemento es completamente libre de expandirse y se reducen con la profundidad debido a la restricción impuesta por el suelo. En general, los datos obtenidos en Matlab ® en el algoritmo aquí implementado presentan un buen ajuste con respecto a los experimentales.



Figura I.4. Comparación de resultados obtenidos en caso EPFL: (a) Fuerza axial en *T7* y (b) Deformaciones en la pila en *T1* 

#### I.4. Caso D. Estudio paramétrico, Knellwolf et al. 2011

Knellwolf *et al.* (2011) propusieron tres casos hipotéticos para ilustrar cómo el cambio de temperatura afecta a diferentes tipos de pilas (por punta, flotantes y semi-flotantes). El objetivo era evaluar situaciones críticas que pudieran llevar a la falla estructural del elemento,

así como verificar el estado límite de servicio. Para esta calibración se emplearon los resultados de esfuerzos y deformaciones obtenidos en la pila flotante y semi-flotante.

### I.4.1. Condiciones iniciales y propiedades de los materiales

En el modelo se consideró que la pila estaba instalada en una capa de suelo homogénea con un espesor de 10 m. La pila consiste en un elemento de concreto de 10.0 m de longitud y un diámetro de 0.5 m. Se supuso un módulo de elasticidad del concreto de 30 GPa y un coeficiente de expansión térmica de -1 x  $10^{-5\circ}$ C<sup>-1</sup>. En la Tabla I.3 se presentan los parámetros geotécnicos utilizados en el análisis.

 Tabla I.4. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la calibración del caso Knellwolf

 et al. (2011)

Tipo de pila	<b>P</b> (kN)	qs (kPa)	q <sub>b</sub> (kPa)	K <sub>h</sub> (Gpa/m)	$\Delta_{\rm T}(^{\circ}{\rm C})$	$E_M$ (kPa)
Flotante	650	50	0	10	15	20000
Semi-flotante	2500	250	38200	45	50	60000

Nota:  $E_M$  es el módulo presiométrico de Menard,  $q_s$  la resistencia unitaria de la interfaz pilasuelo,  $q_b$  la resistencia unitaria en la punta,  $K_h$  la rigidez impuesta por la superestructura, Pla carga mecánica y  $\Delta_T$  el incremento de temperatura

### I.4.2. Análisis de resultados

En la Figura I.4 se muestra la distribución de fuerzas axiales y esfuerzos a lo largo de la pila flotante durante la aplicación de la carga termo-mecánica. Los resultados indican que la carga térmica incrementa la fuerza axial impuesta por el peso del edificio hasta alcanzar la capacidad de carga. Además, su comportamiento es consistente con la forma de trabajo de una pila que experimenta fricción, siendo mayores las fuerzas axiales en la cabeza y aproximadamente cero en la punta. En cuanto a los esfuerzos termo-mecánicos, éstos se encuentran por debajo de la resistencia estructural de la cimentación por lo que la pila no presenta riesgo de falla.

En la Figura I.5 se presentan los resultados de las fuerzas axiales movilizadas y esfuerzos termo-mecánicos en la pila semi-flotante. A diferencia del caso anterior, la resistencia en la punta de la cimentación incrementa la fuerza axial en esta zona, sin embargo, no excede la capacidad de carga en ningún punto. Por otro lado, la magnitud de los esfuerzos es mayor en la fracción superior de la pila debido al valor de la rigidez *Kh* impuesta en la cabeza; el efecto del suelo rígido ubicado en la punta también resulta en un esfuerzo adicional en esta zona. De estos resultados se advierte la importancia de considerar las condiciones de frontera a las que se encuentra sujeta la pila, ya que en algunos puntos la compresión producida por el calentamiento excede la resistencia estructural de la cimentación. Finalmente, el ajuste presenta una buena estimación del comportamiento termo-mecánico de las pilas sujetas a distintas condiciones de trabajo.



Figura I.5. Comparación de resultados en caso Knellwolf: a) Fuerza axial, b) Esfuerzos termomecánicos en pila flotante



Figura I.6. Comparación de resultados obtenidos en caso Knellwolf: a) Fuerza axial, b) Esfuerzos termo-mecánicos en pila semi-flotante

# ANEXO II. CÓDIGO <u>EPILES</u> IMPLEMENTADO PARA EL CÁLCULO TERMO-MECÁNICO DE PILAS DE ENERGÍA

En este anexo se presenta el código *EPiles* desarrollado en Matlab ®, el cual, se fundamenta en curvas de transferencia de carga para el análisis de la respuesta termo-mecánica en pilas de energía. A continuación, se presenta el código del primer módulo donde se realiza el análisis mecánico y se establecen los valores iniciales para las variables necesarias en el cálculo. El ciclo principal establece que la sumatoria entre la carga *P* transferida por el peso del edificio y la fuerza en la cabeza obtenida por equilibrio  $Q_{t, M}$  (definida con la letra *R*) debe ser menor que la tolerancia definida por el usuario para que la pila se encuentre en equilibrio. Mientras no se cumpla esta condición, los comandos o instrucciones seguirán ejecutándose hasta encontrar el valor correcto de las fuerzas y desplazamientos. Dentro de este ciclo se ejecuta lo siguiente:

- El primer paso es resolver el elemento ubicado en la base de la cimentación (N) proponiendo el desplazamiento *zb* y suponiendo que la fuerza actuante en la cabeza  $Q_{t, M}$  es cero inicialmente. Con el método de transferencia de carga propuesto, se determinan las fuerzas axiales del segmento analizado hasta que la carga propuesta inicialmente en la cabeza del elemento con la nueva fuerza axial obtenida  $Q_{t, M, nueva}$  son iguales.
- Una vez resuelta la base de la pila, el segundo paso consiste en suponer que el desplazamiento  $z_{t, M}$  es igual al desplazamiento del fondo  $(z_{b, M})$  del siguiente

segmento y se determinan las fuerzas axiales correspondientes. El procedimiento para cada elemento sucesivo se repite hasta llegar a la cabeza de la cimentación.

• La carga *P* transferida por el peso del edificio y la fuerza axial de la cabeza *Q*<sub>t, M</sub> no necesariamente serán iguales. En las últimas líneas dentro del bucle principal se utiliza una variación del método Newton-Raphson para encontrar el desplazamiento en la base de la pila que permite cumplir con la condición inicial.

Una vez que converge la solución de la pila y termina de ejecutarse el ciclo principal, los comandos finales del módulo indican el cálculo de los esfuerzos y deformaciones a lo largo de toda la cimentación.

```
%Módulo mecánico%
                                    %Último desplazamiento propuesto en el pie
zbo=0:
                                    %Fuerza en la cabeza por equilibrio
R=0;
                                    %Desplazamiento propuesto en el pie
zb=-1;
while abs(P+R)>tol
 for i=N:-1:1
                                     %Intervalos de N a 1
                                     %Para el fondo del primer elemento
  if i==N
    QtM(i)=0;
                                     %Proponer la fuerza en la parte superior con un valor inicial pequeño
    zbM(i)=zb;
                                     %Proponer este valor igual al valor inicial de pb (cero para iniciar)
    tb(i)=qzcurve(Kb(vcont(i)),qb(vcont(i)),zbM(i));
     QbM(i)=(tb(i)*Ab);
                                     % Fuerza en el fondo de la curva Q-z
  else
    zbM(i)=ztM(i+1);
                                     % Establecer el desplazamiento en la base del elemento i igual al
                                     desplazamiento en la cabeza del elemento i+1
                                     % Establecer fuerza en la base del elemento i igual a la fuerza en la
    QbM(i)=-QtM(i+1);
                                    cabeza del elemento i+1
                                     % Establecer fuerza en la cabeza del elemento i igual a 0
    QtM(i)=0;
  end
  DOt=100;
                                 %Proponer cambio de la fuerza en la parte superior con un valor inicial alto
  while DQt>tol
   QaveM(i) = (-QtM(i)+QbM(i))/2;
                                                  % Fuerza media en el elemento i
   deltaM(i)=(QaveM(i)/Ki(i));
                                                  % Deformación elástica en el elemento i
                                                  % Desplazamiento en la cabeza del elemento i
   ztM(i)=zbM(i)-deltaM(i);
   zsM(i)=zbM(i)-deltaM(i)/2;
                                                   % Desplazamiento en la parte media del elemento i
                                                      % Esfuerzo de fricción medio en el elemento i
   ts(i)=tzcurve(Ks(vcont(i)),qs(vcont(i)),zsM(i));
                                                   % Fuerza de fricción media a lo largo del elemento i
   QsM(i)=ts(i)*As(i);
   QtnewM(i) = -(QsM(i)+QbM(i));
                                                   % Nueva fuerza en la parte superior del elemento i
                                                    obtenida por equilibrio
                                                   % Cambio en la fuerza en la parte superior del elemento
   DQt=(QtnewM(i)-QtM(i));
   QtM(i)=QtnewM(i);
                                                   % Nueva carga en la cabeza del elemento i
  end
 end
 %Encontrar el siguiente desplazamiento en el pie
 QsMtot=sum(QsM);
                                    % Fuerza cortante lateral total
 R=QsMtot+QbM(N);
                                    % Reacción total de la pila = Fuerza cortante total + Fuerza en la base
 ksec=R/zb;
                                    % Pendiente secante para encontrar el siguiente pb
 zbo=zb;
 zb=zb-(P+R)/ksec;
                                   %(P+R) es la fuerza no balanceada
end
QaveM=(-QtM+QbM)/2;
zb=zbo:
sM=-(deltaM./Li*1e6);
                                   % Cálculo de la deformación unitaria (x10-6)
```

sigmaM=-(QaveM/Ab); % Cálculo del esfuerzo axial (kN/m2)

A continuación, se describe el segundo módulo del programa, en el que se ejecuta el cálculo termo-mecánico. Para este caso el código se divide en dos partes: la primera resuelve la porción de la pila por debajo del punto nulo y la segunda, la zona ubicada sobre el punto nulo. La condición del ciclo principal establece que, mientras la nueva elongación térmica sea diferente al valor propuesto inicialmente, los comandos o instrucciones seguirán ejecutándose hasta encontrar las fuerzas y desplazamientos adecuados. Las operaciones realizadas en este ciclo son las siguientes:

- Se calculan los desplazamientos a partir del elemento *N1*<sub>+1</sub> a *N*. La subrutina indica que el desplazamiento en la cabeza del segmento por debajo del punto nulo debe ser igual a cero y realiza el cálculo de los elementos subsecuentes.
- A partir de los valores anteriores y con la función de transferencia de carga asignada a las condiciones térmicas, se obtienen las fuerzas actuantes en el segmento analizado.
- Finalmente, se determinan los esfuerzos termo-mecánicos y la nueva elongación térmica hasta que se cumple la condición inicial.

Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento para la fracción de la pila sobre el punto nulo. El cálculo comienza a partir del elemento N1 hasta llegar a la cabeza de la cimentación.

```
%Módulo termo-mecánico%
                                 %Parámetro para controlar la velocidad de actualización de deltaT
m=30;
%Cálculo de la parte del fondo
DdeltaTM=Inf;
for b=1:N2
  deltaT(N1+1:N,1)=Li(N1+1:N)*alphaT(vb(b))*DT(vb(b));
                                                              %Elongación térmica suponiendo un cuerpo
                                                               libre
end
while sum(abs(DdeltaTM))>tol
 for j=N1+1:N
  if j==N1+1
    ztT(j)=0;
                                 %Desplazamiento en la cabeza del elemento por debajo del NP
  else
    ztT(j)=zbT(j-1);
                                %Establecer desplazamiento en la cabeza del elemento j igual al
                                desplazamiento en la base del elemento j-1
  end
    ztTM(j) = ztM(j) + ztT(j);
                                          %Desplazamiento termo-mecánico en la cabeza del elemento
                                          %Desplazamiento térmico en la parte media del elemento
    zsT(j) = ztT(j) + deltaT(j)/2;
    zsTM(j)=zsM(j)+zsT(j);
                                         %Desplazamiento termo-mecánico en la parte media del elemento
    zbT(j) = ztT(j) + deltaT(j);
                                         %Desplazamiento térmico en la base del elemento
                                         %Desplazamiento termo-mecánico en la base del elemento
    zbTM(j) = zbM(j) + zbT(j);
 end
 %Calcular la fuerza basada en el desplazamiento%
 for j=N:-1:N1+1
  if j==N
    tbT(j)=tbthermal(Kb(vcont(j)),qb(vcont(j)),zbTM(j));
    if tbT(j)<0
```

tbT(j)=0;	
QbTM(j)=tbT(j)*Ab;	%Fuerza termo-mecánica en el fondo de la curva Q-z
QbTM(j)=-QtTM(j+1);	%Establecer fuerza en la base del elemento j igual a la fuerza en la cabeza del elemento j+1
tsT(j)=tzthermal(Ks(vcont(j)),qs(vcon	nt(j)),zsM (j),deltaS (j), zsTM(j)); %Esfuerzo de fricción medio
QsTM(j)=tsT(j)*As(j); QtTM(j)=-(QbTM(j)+QsTM(j)); end	%Fuerza de fricción media a lo largo del elemento %Fuerza en la cabeza del elemento j
%Actualizar el deltaT% QaveTM=(-QtTM+QbTM)/2; sigmaTM=-(QaveTM/Ab); sigmaT=sigmaTM-sigmaM; deltanewT=([zeros(N1,1);zeros(N2,1)+deltanewT=(deltanewT-deltaT)/m+deltaT; DdeltaT=(deltanewT-deltaT)/m+deltaT; DdeltaTM=deltaT-deltanewT; end	%Fuerza media en el elemento j %Esfuerzo termo-mecánico en el elemento j %Esfuerzo térmico en el elemento j eltaTL(N1+1:N)-deltaM(N1+1:N)]-sigmaTM.*Li/(E)); %Nueva elongación con base en las fuerzas calculadas %Actualización de la elongación térmica del elemento j
%Cálculo de la parte superior% DdeltaTM=Inf; for t=1:N1 deltaT=[Li(1:N1)*alphaT(vt(t))*DT(vt(t	));deltaT(N1+1:N)]; %Elongación térmica suponiendo un
end	cucipo nore
for j=N1:-1:1	
if j==N1 zbT(j)=0;	%Desplazamiento en la base del elemento sobre el NP
zbT(j)=ztT(j+1);	%Establecer desplazamiento en la base del elemento j igual al desplazamiento en la cabeza del elemento j+1
end	
zb1M(j)=zbM(j)+zb1(j); zsT(j)=zbT(j)-deltaT(j)/2; zsTM(j)=zsM(j)+zsT(j); deltaS(j)=zsTM(j)-zsM(j);	%Desplazamiento termo-mecánico en la base del elemento %Desplazamiento térmico en la parte media del elemento %Desplazamiento termo-mecánico en la parte media del elemento %Diferencia entre el nuevo desplazamiento termo-mecánico y el
ztT(j)=zbT(j)-deltaT(j); ztTM(j)=ztM(j)+ztT(j);	%Desplazamiento térmico en la cabeza del elemento %Desplazamiento termo-mecánico en la cabeza del elemento
end %Cálculo de la fuerza basada en el despla for j=1:N1 if i==1	azamiento%
QtTM(j)=-Kh*(ztTM(j)-ztM(j))+P;	%Fuerza termo-mecánica en la cabeza del elemento j
QtTM(j)=-QbTM(j-1);	%Establecer fuerza en la cabeza del elemento j igual a la fuerza en la base del elemento i-1
end	, -
tsT(j)=tzthermal(Ks(vcont(j)),qs(vcont(j	j)),deltaS(j),ts(j),zsM(j),zsTM(j)); %Esfuerzo de fricción
QsTM(j)=(tsT(j)*As(j));	%Fuerza de fricción media a lo largo del elemento j

QbTM(j) = -(QtTM(j) + QsTM(j));	%Fuerza en la base del elemento j
%Nuevo delta1%	
QaveTM = (-QtTM(1:N1) + QbTM(1:N1))/2;	%Fuerza media en el elemento j
sigmaTM=-(QaveTM/Ab);	%Esfuerzo termo-mecánico en el elemento j
deltanewT=([zeros(N1,1)+deltaTL(1:N1)-sigma]	TM.*Li(1:N1)/(E)-deltaM(1:N1);deltaT(N1+1:N)]);
	%Nueva elongación con base en las fuerzas calculadas
deltaT=(deltanewT-deltaT)/m+deltaT;	%Nueva elongación térmica del elemento j
DdeltaTM=deltaT-deltanewT;	
end	

En el módulo principal se solicita que el usuario ingrese los parámetros del suelo que componen el modelo geotécnico y las características estructurales de la cimentación. Al ejecutar el código, se tiene que indicar el número de estratos del caso de estudio y quedando definido por la variable *Ne*. Posteriormente, se generan los vectores de las principales variables utilizadas en el programa, los cuales, tienen tantas filas como números de estratos. Una vez que se asignan todos los datos necesarios, se procede a discretizar la pila de energía de la siguiente forma:

- Se definen las variables que indican el punto nulo propuesto anteriormente *NPo* y el nuevo *NP*.
- La condición principal establece que mientras la diferencia entre el *NP* y *NPo* sea mayor que la tolerancia definida por el usuario, el ciclo continúa realizando el cálculo.
- Dentro de este bucle se divide la pila de energía en los elementos ubicados sobre el punto nulo como *N1* y la fracción por debajo del punto nulo como *N2*. Si la ubicación del *NP* es menor que la mitad de la cimentación se ejecuta la primera condición, en caso contrario, la discretización se realiza de acuerdo con los siguientes comandos.
- A continuación, se calcula la longitud y profundidad media de cada segmento.
- Se llama al primer módulo que contiene el análisis mecánico (*calcMec*) y el programa guarda los resultados obtenidos.
- Los siguientes comandos dividen el vector de control *vcont*, el cual indica el número de estrato correspondiente al segmento analizado, en los elementos ubicados sobre y por debajo del *NP*. Lo anterior permite realizar el cálculo térmico por separado sin generar errores en el programa.
- El programa llama al segundo módulo *calculoTM* y realiza el cálculo termomecánico.

Finalmente, se calcula la fuerza no balanceada *unb* con base en los resultados obtenidos del análisis termo-mecánico. El ciclo indica lo siguiente: Si la fuerza no balanceada es negativa, el punto nulo real se ubica por debajo del punto nulo propuesto inicialmente y es necesario ajustar su valor. En cambio, si la fuerza no balanceada es positiva, el punto nulo real se ubica sobre el punto nulo propuesto inicialmente. Este proceso continúa hasta que la *unb* sea menor que la tolerancia definida por el usuario y el comportamiento termo-mecánico de la pila sea resuelto.

```
%EPiles%
clc; clear;
format long e
warning off
%DEFINIR VARIABLES%
%DESCRIPCIÓN DEL SUELO%
disp('DESCRIPCIÓN DEL SUELO');
Ne=input('Ingresar número de estratos: ');
                                                 %Número de estratos
EMenard=zeros(Ne,1);
                                                 %Módulo de Menard (kPa)
alphaB=zeros(Ne,1);
                                                 %Constante de acuerdo al tipo de suelo, para curva Q-z
alphaS=zeros(Ne,1);
                                                 %Constante de acuerdo al tipo de suelo, para curva Q-z
qs=zeros(Ne,1);
                                                  %Resistencia última al corte del estrato (kPa)
qb=zeros(Ne,1);
                                                  %Capacidad de carga del estrato (kPa)
espesor=zeros(Ne,1);
                                                  %Espesor de cada estrato (m)
Kb=zeros(Ne,1);
                                                 %Pendiente de la rama lineal para curva Q-z
Ks=zeros(Ne,1);
                                                 %Pendiente de la rama lineal para curva t-z
for m=1:Ne
  fprintf('Ingrese el espesor del estrato %g ',m);
  espesor(m)=input('en (m)= ');
end
Ndata=(espesor*10);
                                                  % Número de elementos (longitud 10 cm) en cada estrato
N=sum(Ndata);
                                                 % Número de elementos totales
vcont=repelem(1:Ne,Ndata);
                                                 % Vector de control, indica número de estrato
                                                 correspondiente al elemento i
for m=1:Ne
  fprintf('Ingrese el EMenard del estrato %g ',m);
  EMenard(m)=input('en (KN)=');
end
for m=1:Ne
  fprintf('Ingrese el alphaB del estrato %g ',m);
  alphaB(m)=input('en (KN)= ');
end
for m=1:Ne
  fprintf('Ingrese el alphaS del estrato %g ',m);
  alphaS(m)=input('en (KN)=');
end
for m=1:Ne
  fprintf('Ingrese la resistencia última al corte del estrato %g ',m);
  qs(m)=input('en (KN)=');
end
for m=1:Ne
  fprintf('Ingrese la capacidad de carga del estrato %g ',m);
  qb(m)=input('en (KN)= ');
end
%%DESCRIPCIÓN DE LA CIMENTACIÓN%%
disp('DESCRIPCIÓN DE LA CIMENTACIÓN');
L=input('L=');
                                                     %Longitud de la pila (m)
D=input('D= ');
```

%Diámetro de la pila (m) Ab= $pi*D^2/4;$ %Área de la base (m2) %Circunferencia de la pila (m) E=input('E= '); %Módulo de Young de la pila (kPa) %Rigidez en la cabeza de la pila (kPa) Kh=input('Kh=');

Cs=pi\*D;

%%ANÁLISIS MECÁNICO T-Z%% disp('ANÁLISIS MECÁNICO T-Z'); P=input('P='); tol=input('tol=');

#### %%VARIABLES INICIALES%%

QbM=zeros(N,1); tb=zeros(N,1); ts=zeros(N,1); QtM=zeros(N,1); QsM=zeros(N,1); zbM=zeros(N,1); ztM=zeros(N,1); gaveM=zeros(N,1); deltaM=zeros(N,1); sm=zeros(N,1); sigmaM=zeros(N,1); zb=0; ksec=0;

#### %%INCREMENTO DE TEMPERATURA%% DELTAT=input('DELTAT= '); DT=repelem(DELTAT,Ne);

ALPHAT=input('ALPHAT=');

alphaT=repelem(ALPHAT,Ne);

#### %%VARIABLES INICIALES%%

QbT=zeros(N,1); QbTM=zeros(N,1); tsT=zeros(N,1); tbT=zeros(N,1); QtT=zeros(N,1); QtTM=zeros(N,1); QsT=zeros(N,1); QsTM=zeros(N,1); zbT=zeros(N,1); zbTM=zeros(N,1); ztT=zeros(N,1); ztTM=zeros(N,1); zsT=zeros(N,1); zsTM=zeros(N,1); QaveTM=zeros(N,1); deltaT=zeros(N,1); sT=zeros(N.1); sTM=zeros(N,1); sigmaT=zeros(N,1); sigmaTM=zeros(N,1); deltanewT=zeros(N,1); deltaS=zeros(N,1);

%Carga mecánica (kN), se ingresa con signo negativo %Tolerancia definida por el usuario

%Fuerza mecánica en la base del elemento (kN) %Esfuerzo mecánico en la base del elemento (kPa) %Esfuerzo mecánico en la parte media del elemento (kPa) %Fuerza mecánica en la cabeza del elemento (kN) %Fuerza mecánica a la mitad del elemento (kN) %Desplazamiento mecánico en la base del elemento (m) %Desplazamiento mecánico en la cabeza del elemento (m) %Desplazamiento mecánico a la mitad del elemento (kN) %Compresión de cada elemento (m) %Deformación de cada elemento %Esfuerzo mecánico (kPa) %Desplazamiento inicial en la base (m) %Pendiente secante utilizada en método de Newton

%Incremento de temperatura

%Vector de incremento de temperatura, repite el valor de acuerdo al número de estratos %Coeficiente de expansión térmica de la pila, ingresar con signo negativo

%Vector de coeficiente de expansión térmica, repite el valor de acuerdo al número de estratos

%Fuerza térmica en la base del elemento (kN) %Fuerza termo-mecánica en la base del elemento (kN) %Esfuerzo termo-mecánico en la parte media del elemento (kPa) %Esfuerzo termo-mecánico en la base del elemento (kPa) %Fuerza térmica en la cabeza del elemento (kN) %Fuerza termo-mecánica en la cabeza del elemento (kN) %Fuerza térmica a la mitad del elemento (kN) %Fuerza termo-mecánica a la mitad del elemento (kN) %Desplazamiento térmico en la base del elemento (m) %Desplazamiento termo-mecánico en la base del elemento (m) %Desplazamiento térmico en la cabeza del elemento (m) %Desplazamiento termo-mecánico en la cabeza del elemento (m) %Desplazamiento térmico a la mitad del elemento (m) %Desplazamiento termo-mecánico a la mitad del elemento (m) %Fuerza termo-mecánica media en cada elemento (kN) %Expansión térmica de cada elemento (m) %Deformación térmica de cada elemento %Deformación termo-mecánica de cada elemento %Esfuerzo térmico (kPa) %Esfuerzo termo-mecánico (kPa) %Nueva elongación con base en las fuerzas calculadas %Diferencia entre el nuevo desplazamiento termo-mecánico y el desplazamiento mecánico

unb=0;

%%DISCRETIZACIÓN DE LA PILA%% NP=10; NPo=1e-3;	%Punto nulo propuesto (m) %Punto nulo anterior (m)
dNP=L/N; while abs(NP-NPo)>=tol if NP <l 2<="" td=""><td>%Incremento para definir el siguiente NP</td></l>	%Incremento para definir el siguiente NP
N1=max(round(NP/L*N),0.1*N); N2=N-N1; else N2=max(round((L-NP)/L*N),0.1*N); N1=N-N2; end	%Número de elementos sobre el NP %Número de elementos debajo del NP
Li=[zeros(N1,1)+NP/N1;zeros(N2,1)+(L-NP) z=[(0:1:N1-1)'*NP/N1+NP/N1/2';(0:1:N2-1)'	)/N2]; %Longitud de cada elemento (m) *(L-NP)/N2+NP+(L-NP)/N2/2]; %Profundidad media de cada elemento (m)
As=Cs.*Li; Ki=Ab*E./Li;	%Área lateral de cada elemento (m2) %Rigidez axial de cada elemento (kPa)
<pre>for m=1:Ne     Kb(m)=alphaB(m,1)*EMenard(m,1)/D; end for m=1:Ne     Ks(m)=alphaS(m,1)*EMenard(m,1)/D; end</pre>	
calcMec;	%Módulo para calcular el comportamiento de la pila bajo carga mecánica
%%CÁLCULO TERMO-MECÁNICO%% vt=vcont(1:N1); vb=vcont(N1+1:N); deltaTL(1:N,1)=Li*ALPHAT*DELTAT; calculoTM;	%Vector que indica los elementos sobre el punto nulo %Vector que indica los elementos por debajo del punto nulo %Expansión térmica sujeta a condiciones de cuerpo libre %Módulo para calcular el comportamiento termo-mecánico de la pila
%PUNTO NULO% unb=(QtTM(N1+1)+QbTM(N1)); if(unb<0)&&(NP+dNP <l) NPo=NP; NP=NP+dNP.</l) 	%Fuerza no balanceada a la profundidad del NP %Caso donde el NP se encuentra por debajo del asumido
else if NP+dNP <l dNP=dNP/2; NP=NPo+dNP; dNP=dNP/2; else dNP=dNP/2; end end</l 	%Caso donde el NP se encuentra sobre el NPo
end sT=(deltaT./Li*1e6); QsT=QsTM-QsM; QbT=QbTM-QbM; QtT=QtTM-QtM; QaveTM=-(QtTM-QbTM)/2; sTM=sT+sM; sigmaTM=-(QaveTM/Ab);	%Deformación térmica %Fuerza térmica a la mitad del elemento (kN) %Fuerza térmica en la base del elemento (kN) %Fuerza térmica en la cabeza del elemento (kN) %Fuerza media en el elemento (kN) %Deformaciones termo-mecánicas %Esfuerzos termo-mecánicos (kPa)