



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 23 de enero de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva

El suscrito:

Laura Vannessa Rojas Oviedo, con C.C. No. 1.110.597.247 de Ibagué,

Autor del trabajo de grado titulado “EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SISTEMA DE CONTENCIÓN COMPUESTO POR PILOTES ANCLADOS EN CONDICIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA ANTE DIFERENTES TIPOS DE FALLAS PARCIALES” presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de INGENIERA CIVIL;

Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Laura Vannessa Rojas Oviedo

Firma: \_\_\_\_\_

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: “EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SISTEMA DE CONTENCIÓN COMPUESTO POR PILOTES ANCLADOS EN CONDICIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA ANTE DIFERENTES TIPOS DE FALLAS PARCIALES.”**

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ROJAS OVIEDO	LAURA VANNESSA

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GIL HERNÁNDEZ	JACKSON ANDRÉS

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERA CIVIL**

**FACULTAD: INGENIERIA**

**PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERIA CIVIL**

**CIUDAD: NEIVA**

**AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023**

**NÚMERO DE PÁGINAS: 79**

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**



Diagramas\_\_X\_ Fotografías\_\_ Grabaciones en discos\_\_ Ilustraciones en general\_\_X\_ Grabados\_\_  
Láminas\_\_ Litografías\_\_ Mapas\_\_ Música impresa\_\_ Planos\_\_ Retratos\_\_ Sin ilustraciones\_\_  
Tablas o Cuadros\_\_X\_

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: NO APLICA

**MATERIAL ANEXO: TESIS DE PREGRADO TITULADA - EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SISTEMA DE CONTENCIÓN COMPUESTO POR PILOTES ANCLADOS EN CONDICIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA ANTE DIFERENTES TIPOS DE FALLAS PARCIALES; EN FORMATO WORD**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Excavación profunda</u>	<u>Deep excavation</u>	6. <u>Acelerogramas sintéticos</u>	<u>synthetic accelerograms</u>
2. <u>Pilotes anclados</u>	<u>anchored piles</u>		
3. <u>MIDAS GTS NX</u>	<u>MIDAS GTS NX</u>		
4. <u>Falla de anclajes</u>	<u>anchor failure</u>		
5. <u>Análisis estático y dinámico</u>	<u>static and dynamic analysis</u>		

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

La presente investigación tiene como objetivo realizar la evaluación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por pilotes anclados ante diferentes tipos de fallas parciales a partir de un modelo numérico calibrado con el software MIDAS GTS NX. El análisis se basó en un caso particular de la tesis del ingeniero Felipe Salas donde se evalúa la excavación del edificio parque Oriente en Santiago de Chile realizando un análisis numérico mediante el método de elementos finitos (FEM) en el software MIDAS GTS NX.

Se verificó el comportamiento mecánico de la estructura de contención ante diferentes tipos de fallas en el sistema de retención en condiciones estáticas y dinámicas, para esto se adoptan diferentes tipos





de casos en donde se combina una serie de fallas en los elementos. Para las condiciones dinámicas, se generó un acelerograma sintético que representa las condiciones sísmicas de la zona de estudio según la norma de diseño sísmico chilena NCh433.

Con los resultados obtenidos, se analizó el comportamiento general de los sistemas para las diferentes condiciones obteniendo datos de deformaciones a lo largo del pilote, fuerzas axiales en los anclajes y desplazamientos relativos de los anclajes, este último para las condiciones dinámicas. Se encuentra que implementar una viga cabezal en el sistema de retención es primordial, ya que ayuda a controlar la distribución de las deformaciones. En cuanto al modelo sometido a condiciones dinámicas, se logra apreciar un incremento de esfuerzos axiales y desplazamientos relativos en los anclajes cercanos al elemento de falla.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

The objective of this research is to evaluate the mechanical behavior of a containment system composed of anchored piles under different types of partial failures using a numerical model calibrated with MIDAS GTS NX software. The analysis was based on a particular case of the thesis of the engineer Felipe Salas where the excavation of the Parque Oriente building in Santiago de Chile is evaluated by performing a numerical analysis using the finite element method (FEM) in MIDAS GTS NX software.

The mechanical behavior of the retaining structure was verified under different types of failures in the retaining system under static and dynamic conditions, adopting different types of cases where a series of failures in the elements are combined. For the dynamic conditions, a synthetic accelerogram was generated to represent the seismic conditions of the study area according to the Chilean seismic design standard NCh433.

With the results obtained, the general behavior of the systems was analyzed for the different conditions, obtaining data on deformations along the pile, axial forces in the anchors and relative displacements of the anchors, the latter for the dynamic conditions. It is found that implementing a head beam in the restraint system is paramount, since it helps to control the distribution of



deformations. As for the model subjected to dynamic conditions, an increase in axial forces and relative displacements in the anchors close to the failure element is observed.

#### APROBACION DE LA TESIS

ING. JACKSON ANDRES GIL HERNÁNDEZ:

Firma:

ING. MAURICIO HERRERA RODRIGUEZ:

Firma:

ING. LUZ DIVIA QUIMBAYA CUELLAR:

Firma:



# Evaluación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por pilotes anclados en condición estática y dinámica ante diferentes tipos de fallas parciales.

Laura Vannessa Rojas Oviedo

Universidad Surcolombiana de Colombia  
Facultad de ingeniería, Programa de ingeniería civil  
Neiva, Colombia

2023



# Evaluación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por pilotes anclados en condición estática y dinámica ante diferentes tipos de fallas parciales

Laura Vannessa Rojas Oviedo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Civil

Director:

M.Sc. Jackson Andrés Gil Hernández

Línea de Investigación:

Geotecnia

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de ingeniería, Programa de ingeniería civil

Neiva, Colombia

2023





*A mis padres, mis hermanos, a Camilo, a Juan, al ingeniero Johan y a mi tutor, el ingeniero Jackson y a mis demás amigos y compañeros que fueron parte del proceso.*

*“El miedo es inevitable, tengo que aceptarlo, pero no puedo permitir que me paralice.”*

*Isabel Allende*

## Resumen

La presente investigación tiene como objetivo realizar la evaluación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por pilotes anclados ante diferentes tipos de fallas parciales a partir de un modelo numérico calibrado con el software MIDAS GTS NX. El análisis se basó en un caso particular de la tesis del ingeniero Felipe Salas donde se evalúa la excavación del edificio parque Oriente en Santiago de Chile realizando un análisis numérico mediante el método de elementos finitos (FEM) en el software MIDAS GTS NX.

Se verifico el comportamiento mecánico de la estructura de contención ante diferentes tipos de fallas en el sistema de retención (anclajes, pilotes y viga cabezal) en condiciones estáticas y dinámicas, para esto se adoptan diferentes tipos de casos en donde se combina una serie de fallas en los elementos que componen el sistema. Para las condiciones dinámicas, se generó un acelerograma sintético que representa las condiciones sísmicas de la zona de Santiago según la normal de diseño sísmico chilena NCh433off1996 modificada 2012.

Con los resultados obtenidos, se analizó el comportamiento general de los sistemas para las diferentes condiciones (estáticas y dinámicas) obteniendo datos de deformaciones a lo largo del pilote, fuerzas axiales en los anclajes y desplazamientos relativos en la punta de los anclajes, este último para las condiciones dinámicas. Se encuentra que implementar una viga cabezal en el sistema de retención es primordial, ya que ayuda a controlar la distribución de las deformaciones. En cuanto al modelo sometido a condiciones dinámicas, se logra apreciar un incremento de esfuerzos axiales y desplazamientos relativos en los anclajes cercanos al elemento de falla.

**Palabras clave:** Excavación profunda, pilotes anclados, MIDAS GTS NX, falla de anclajes, análisis estático y dinámico, acelerogramas sintéticos.

# Abstract

The objective of this research is to evaluate the mechanical behavior of a containment system composed of anchored piles under different types of partial failures using a numerical model calibrated with MIDAS GTS NX software. The analysis was based on a particular case of the thesis of the engineer Felipe Salas where the excavation of the Parque Oriente building in Santiago de Chile is evaluated by performing a numerical analysis using the finite element method (FEM) in the MIDAS GTS NX software.

The mechanical behavior of the retaining structure under different types of failures in the retaining system (anchors, piles and head beam) was verified under static and dynamic conditions, adopting different types of cases where a series of failures in the elements that compose the system are combined. For the dynamic conditions, a synthetic accelerogram was generated to represent the seismic conditions of the Santiago area according to the Chilean seismic design standard NCh433off1996 modified 2012.

With the results obtained, the general behavior of the systems was analyzed for the different conditions (static and dynamic), obtaining data on deformations along the pile, axial forces in the anchors and relative displacements at the anchor tips, the latter for the dynamic conditions. It is found that implementing a head beam in the restraint system is paramount, as it helps to control the distribution of deformations. As for the model subjected to dynamic conditions, an increase of axial forces and relative displacements in the anchorages close to the failure element is observed.

Keywords: Deep excavation, anchored piles, MIDAS GTS NX, anchor failure, static and dynamic analysis, synthetic accelerograms.

# Contenido

	Pág.
Resumen.....	VI
Lista de figuras .....	X
Lista de tablas .....	XII
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XIII
Capítulo 1 .....	17
<b>1. Introducción .....</b>	<b>17</b>
1.1 Antecedentes .....	19
1.2 Justificación.....	22
1.3 Objetivos .....	23
1.3.1 Objetivo general .....	23
1.3.2 Objetivos específicos .....	23
Capítulo 2 .....	25
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>25</b>
2.1 Sistema de contención mediante pilotes anclados.....	25
2.2 Anclajes.....	26
2.3 Cabezal sobre pilotes o viga cabezal. ....	27
2.4 Pilotes. ....	27
2.5 Método de elementos finitos (FEM).....	28
2.6 Software MIDAS GTS NX.....	29
2.7 Modelo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS-Small) .....	29
2.8 Acelerogramas sintéticos.....	31
2.8.1 Software AcelSin.....	32
Capítulo 3 .....	33
<b>3. Metodología.....</b>	<b>33</b>



---

3.1. Propiedades geométricas y mecánicas del suelo y de la estructura de contención.	35
3.1.1. Propiedades geométricas y mecánicas del suelo. ....	35
3.1.2. Propiedades geométricas y mecánicas de la estructura de contención. ....	36
3.2. Modelación numérica del caso de estudio. ....	39
3.3. Análisis estático. ....	41
3.3.1. Calibración del caso de análisis. ....	42
3.4. Análisis dinámico. ....	44
3.4.1. Generación acelerograma sintético según normativa NCh433 (2012). ....	46
3.5. Casos de análisis. ....	48
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>55</b>
<b>4. Análisis de resultados</b> .....	<b>55</b>
4.1 Condiciones estáticas .....	57
4.1.1 Comportamiento de las deformaciones .....	57
4.1.2 Comportamiento de las fuerzas axiales .....	60
4.2 Condiciones dinámicas .....	63
4.2.1 Comportamiento de las fuerzas axiales .....	63
4.2.2 Comportamiento de los desplazamientos relativos .....	65
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>67</b>
<b>5. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones</b> .....	<b>67</b>
5.1. Conclusiones. ....	67
5.2. Limitaciones y recomendaciones. ....	69
<b>Bibliografía</b> .....	<b>75</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1.</b> Aplicaciones de los pilotes anclados. Tomado de (Keller, 2019).....	26
<b>Figura 2-2.</b> Coordenadas nodales (i, j, m) y desplazamientos de los nodos. Tomado de (Frías Valero, 2004).....	28
<b>Figura 2-3.</b> Comportamiento característico rigidez-deformación del suelo con rangos de deformación típicos para laboratorio y estructuras. Tomado de (Herold et al, 2009). ....	30
<b>Figura 3-1.</b> Ejemplo de excavación sobre pilotes realizada en grava de Santiago. Tomado de (Salas, 2018).....	33
<b>Figura 3-2.</b> Metodología desarrollada para el análisis del caso de estudio. ....	34
<b>Figura 3-3.</b> Dimensiones de los elementos de la estructura de contención. ....	37
<b>Figura 3-4.</b> Caso de estudio modelado en MIDAS GTS NX para análisis en condiciones estáticas. ....	39
<b>Figura 3-5.</b> Caso de estudio modelado en MIDAS GTS NX para análisis en condiciones dinámicas. ....	40
<b>Figura 3-6.</b> a) Deformaciones registradas para la etapa 6. b) Deformaciones registradas para la etapa 8 y c) Trazado de la excavación con pilote instrumentado n° 13. Tomado de (Salas, 2018). ....	43
<b>Figura 3-7.</b> Espectro de diseño para Santiago de Chile zona II, suelo B. Según NCh433.Of1996 modificada en 2012.....	46
<b>Figura 3-8.</b> Señales sintéticas para a) 20 segundos, b) 40 segundos y c) 60 segundos en una frecuencia de muestreo de 20 HZ.....	47
<b>Figura 3-9.</b> Revisión de ajustes de los espectros de diseño para las señales sintéticas de 20 s, 40 s y 60 s. ....	48
<b>Figura 4-1.</b> Resultados del modelo base en condiciones estáticas a) deformaciones máximas en los pilotes y b) Fuerzas axiales en los anclajes. ....	56
<b>Figura 4-2.</b> Resultados de fuerzas axiales del modelo base ante condiciones dinámicas a) Acelerograma de 20 segundos, b) Acelerograma de 40 segundos y c) Acelerograma de 60 segundos. ....	56

---

<b>Figura 4-3.</b> Resultados de Desplazamientos relativos en los anclajes en el modelo base en condiciones dinámicas a) Acelerograma de 20 segundos, b) Acelerograma de 40 segundos y c) Acelerograma de 60 segundos. ....	57
<b>Figura 4-4.</b> Deformaciones máximas para condiciones Estáticas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6” y d) caso de análisis “C7”. ....	58
<b>Figura 4-5.</b> Fuerzas axiales para condiciones estáticas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6” y d) caso de análisis “C7”.....	61
<b>Figura 4-6.</b> Fuerzas axiales para condiciones dinámicas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6”, g) caso de análisis “C7”, h) caso de análisis “C8” y i) caso de análisis “C9”.....	64
<b>Figura 4-7.</b> Desplazamientos relativos para condiciones dinámicas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6”, g) caso de análisis “C7”, h) caso de análisis “C8” y i) caso de análisis “C9”.....	65
<b>Figura A-5-1.</b> Desplazamientos relativos donde a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2” y c) caso de análisis “C3”.....	71
<b>Figura A 5-2.</b> Desplazamientos relativos donde a) caso de análisis “C4”, b) caso de análisis “C5” y c) caso de análisis “C6”.....	72
<b>Figura A 5-3.</b> Desplazamientos relativos donde a) caso de análisis “C7”, b) caso de análisis “C8” y c) caso de análisis “C9”.....	73

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 3-1.</b> Parámetros de la deposición 1 y deposición 2 usando HS-small. ....	36
<b>Tabla 3-2.</b> Propiedades mecánicas de la viga cabezal y los pilotes. ....	38
<b>Tabla 3-3.</b> Tensiones iniciales y finales establecidas en las filas de anclajes.....	38
<b>Tabla 3-4.</b> Parámetros establecidos para los anclajes.....	38
<b>Tabla 3-5.</b> Etapas del sistema constructivo establecidas para el modelo de análisis en condiciones estáticas. ....	42
<b>Tabla 3-6.</b> Etapas del sistema constructivo establecidas para el modelo de análisis en condiciones dinámicas. ....	45
<b>Tabla 3-7.</b> Casos de análisis modelo en condiciones estáticas. ....	51
<b>Tabla 3-8.</b> Casos de análisis modelo en condiciones dinámicas.....	53

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A_i$	Amplitud de fase	-	Ec. 2.1
$A_0$	Aceleración máxima efectiva	g	Capítulo 3
$a$	Aceleración	g	Figura 3-8
$c'$	Cohesión efectiva	KPa	Tabla 3-1
C1, C2...	Casos de análisis	-	Capítulo 3
$m$	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos	-	Tabla 3-1
$e$	Relación de vacíos	-	Tabla 3-1
$E$	Módulo de elasticidad	KPa	Tabla 3-2
$E_{50}^{ref}$	Rigidez secante en ensayo triaxial	KPa	Tabla 3-1
$E_{oed}^{ref}$	Rigidez Tangencial en ensayo con edómetro	KPa	Tabla 3-1
$E_{ur}^{ref}$	Rigidez en descarga - recarga	KPa	Tabla 3-1
$G_o^{ref}$	Módulo cortante de referencia para $p'_{ref}$ en deformaciones muy pequeñas	KPa	Tabla 3-1
Hz	Hercio	-	Subcapítulo 3.6
$K_o^{nc}$	$K_0$ normalmente consolidado	-	Tabla 3-1
$R_f$	Relación de falla	-	Tabla 3-1
s	segundos	-	Subcapítulo 3.6
T	tiempo	segundos	Figura 3-7
V.C.	Viga cabezal	-	Capítulo 4



Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\nu$	Relación de poisson	-	Tabla 3-2
$\nu_{ur}$	Relación de poisson en descarga recarga	-	Tabla 3-1
Z	Eje en el sentido de la gravedad	-	Subcapítulo 3.3

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\gamma_{0,7}$	Deformación cortante límite	-	Tabla 3-1
$\emptyset_i$	Conjunto de ángulos de fase	°	Ec. 2.1
$\psi$	Angulo de dilatancia	°	Tabla 3-1
$\gamma'$	Peso volumétrico	KN/m <sup>3</sup>	Tabla 3-1

### Subíndices

Subíndice	Término
Ko	Condiciones iniciales
$i$	Iteracion

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
HS	Hardening Soil
HS – Small	Hardening Soil para pequeñas deformaciones
FEM	Método de elementos finitos
MCE	Maximum Considered Earthquake
NCh433	Norma de diseño sísmico chilena

---

Abreviatura	Término
<i>GW-CC</i>	Gravas areno-arcillosas bien graduadas
<i>KN</i>	kilo Newton
<i>THNL</i>	Tiempo historia no lineal



# Capítulo 1

## 1. Introducción

Dentro de la ingeniería civil una de las mayores incógnitas es el comportamiento del suelo a corto, mediano y largo plazo, ya sea durante o después de la construcción de una carretera, una represa, un edificio o cualquier otro tipo de obra, por lo que la interacción suelo-estructura se convierte en uno de los objetivos de estudio y análisis más importantes durante las diferentes etapas de diseño y construcción. Ahora bien, el progreso de las civilizaciones ha llevado al desarrollo de obras con excavaciones de gran magnitud y profundidad, sin embargo, la ejecución de estas en una zona urbana pueden generar efectos contrarios a los esperados como daños estéticos, estructurales y en el peor de los casos el colapso de las edificaciones colindantes y naturalmente la afectación a vidas humanas, lo que conlleva a establecer para la ejecución de este tipo de excavaciones, evaluaciones minuciosas de los sistemas de contención que se implementan para el control de los esfuerzos y deformaciones en la zona contenida (Granados et al., 2018).

Una de las tecnologías seguras de contención en excavaciones profundas más implementadas corresponde al sistema de pilotes anclados el cual presenta buen comportamiento en cualquier tipo de suelo que presente gravas areno-arcillosas, suelos arenosos o suelos arcillosos con partículas de gran tamaño (Arias, 1984). En este sistema, el uso de elementos como los pilotes de concreto reforzado, debido a que son estructuras muy rígidas, no permiten que se deforme el suelo y ofrecen gran seguridad a las estructuras vecinas; sin embargo, debido a empujes de suelo y agua, cuando se presenta nivel freático, es necesario el uso de anclajes activos como elementos de soporte horizontal para reducir las deformaciones y los momentos flectores en el pilote (Saucedo, 2015).

A pesar de la buena respuesta que ha tenido la implementación de este sistema de contención, y que, de manera general se utiliza un número cada vez mayor de anclajes de amarre en ingeniería geotécnica, los problemas relacionados con la confiabilidad y el

rendimiento a largo plazo de los anclajes no se han resuelto (Zhao et al., 2018). También los pilotes de contención pueden fallar por muchas razones, como resistencia de diseño inadecuada, defectos de construcción, problemas de agua, impacto mecánico o caída de puntales (Chen et al., 2017). Lo anterior, genera la necesidad de estudiar el comportamiento general del sistema de pilotes anclados ante la posible falla de algunos elementos como anclajes o pilotes, pues factores como la calidad de la construcción, problemas de diseño, caracterización del terreno, condiciones del agua, entre otros, pueden no haberse gestionado de la manera adecuada.

Zhao et al. (2018), realizó una consulta bibliográfica sobre el comportamiento y la falla de los anclajes de manera general, encontrando que el comportamiento mecánico de las excavaciones y de todas las estructuras de contención después de la falla del anclaje no se ha investigado y requiere más estudios. Adicional a esto, la importancia de la revisión del comportamiento del sistema de contención de pilotes anclados se escala no solo a condiciones estáticas, sino también a condiciones dinámicas. El fenómeno sísmico, es un criterio para tener en cuenta en el diseño y en el sistema constructivo a nivel de la ingeniería, sobre todo en los países latinoamericanos que son propensos a terremotos.

A pesar de la bibliografía encontrada, es posible observar que no se han realizado muchos estudios relacionados con el comportamiento del sistema de contención de pilotes anclados usado en excavaciones profundas, tanto en condiciones estáticas como en condiciones dinámicas, y aun menos, relacionado con el comportamiento cuando ocurren fallas parciales en los elementos que componen el sistema, es por tanto, que a partir de los datos suministrados en la tesis del ingeniero Felipe Salas se buscó generar un modelo numérico que una vez calibrado en el software MIDAS GTS NX, se sometió a una evaluación mecánica en condición estática y luego en condición dinámica, en este último se induce al modelo un acelerograma sintético que representa las condiciones sísmicas de la ciudad de Santiago. El modelo será sometido en ambas condiciones, a fallas parciales ya sea de los anclajes, pilotes o la viga cabezal, pues estudios demuestran que este elemento tiene una influencia positiva en la transferencia de cargas (Cheng et al., 2017).



## 1.1 Antecedentes

Como ya se ha mencionado, las excavaciones profundas se realizan para la construcción de estructuras subterráneas, como sistemas de transporte subterráneo y sótanos de edificios, y que se implementan sistemas de contención como el sistema de pilotes anclados, el cual ha sido evaluado por autores como el ingeniero Felipe Salas, quien mediante el estudio de una excavación ubicada en la comuna de Las Condes en Santiago de Chile, obtuvo datos reales en campo y calibró un modelo bidimensional en elementos finitos utilizando el software Plaxis, el cual fue sometido a condiciones estáticas en donde los resultados de la modelación fueron capaces de reproducir apropiadamente las deformaciones producidas en los pilotes inducidas por la excavación. En cuanto a las condiciones dinámicas, logró obtener un diagrama tiempo-historia de las deformaciones en los anclajes; en general, los resultados le permitieron establecer conclusiones y recomendaciones para el proceso actual de diseño (Salas et al., 2019).

Un estudio similar al del ingeniero Felipe Salas, es el de Sáez & Ledezma (2012), quienes realizan una investigación numérica de las características de las presiones laterales inducidas por terremotos en excavaciones discontinuas apoyadas en pilotes en grava de Santiago. El modelo numérico fue calibrado mediante sobre la base de pruebas triaxiales monotónicas drenadas (CID) isotrópicamente consolidadas para tres niveles de confinamiento. Y la geometría utilizada de la excavación correspondió a una estándar para construir edificios de varios niveles subterráneos en Santiago, de 30 metros de largo, 20 m ancho y 12 metros de profundidad. El modelo fue sometido a trece registros sísmicos evaluando la variabilidad de las presiones dinámicas y su influencia en las fuerzas internas de los pilotes. Se concluyó que el modelo 3D predice una influencia más profunda de la excavación en la estimación de tensiones, también se encontró que la fuerza en los anclajes se transfiere a los pilotes, lo que a su vez induce tensiones en la interfaz pilote-suelo, principalmente tensiones cortantes que actúan en dirección vertical y tensiones horizontales (Sáez & Ledezma, 2012).

Sáez et al. (2015), evaluó una excavación en condiciones sísmicas mediante el análisis numérico de una excavación discontinua apoyada en pilotes de 26 m de profundidad. Debido a los pocos estudios sobre el comportamiento dinámico de excavaciones apoyadas

en pilotes y las presiones laterales inducidas por terremotos sobre soportes de pilotes no secantes, Sáez et al. (2015), tomó los datos de la excavación del Edificio Beauchef en Santiago y desarrolló dos tipos de modelos EF, un modelo de deformación plano 2D aproximado y un modelo completamente 3D. En condiciones estáticas evaluó los desplazamientos laterales a lo largo del pilote en las diferentes etapas constructivas, la fuerza cortante y el momento flector al final de la excavación, se obtuvieron resultados similares entre los modelos 2D y 3D. Con los resultados de análisis dinámico se obtuvo diagrama tiempo-historia en la punta de los pilotes donde el desplazamiento lateral relativo máximo fue de unos 4 mm. Entre el modelo en 2D y el 3D obtuvieron diferencias de hasta el 20% en los resultados.

Malekia et al. (2022), realizó estudios paramétricos en otro método de estabilización de excavaciones profundas, denominado sistema de muro anclado, cuyo funcionamiento es similar al sistema de pilotes anclados. En su investigación, realizó análisis de deformaciones planas de 1296 casos de excavaciones profundas, usando el software Plaxis 2D (2015). Con base en los resultados, se determinó y analizó la deformación de la pared, los movimientos del suelo y el factor de seguridad para la estabilidad general, donde finalmente generó cuadros y tablas de diseño de sistemas de muros anclados.

Cheng et al. (2017) evaluó colapsos progresivos en excavaciones profundas mediante el método explícito de diferencias finitas, los autores simularon el colapso parcial y el colapso progresivo de una excavación de una franja larga, evaluando presiones del suelo y las fuerzas internas del pilote. También simularon excavaciones cuadradas bajo colapso parcial para investigar la influencia del efecto de esquina. El fallo de los pilotes lo realizaron eliminando el respectivo pilote en el modelo, se obtuvo que el suelo detrás de los pilotes se mantuvo estable con la falla de hasta 2 pilotes, luego de fallar 3 pilotes el suelo no pudo permanecer estable y los pilotes adyacentes presentaban un aumento del momento flector, en conclusión, un colapso parcial puede provocar fuertes aumentos en las fuerzas internas en pilotes adyacentes que no sufren daños. También simularon este caso con y sin viga cabezal, encontrando que una estructura de contención que incluya una viga de remate (viga cabezal) continua puede evitar un colapso progresivo.

Respecto a los modelos constitutivos usados en el diseño y análisis de excavaciones en entornos urbanos, Khoiri et al., (2013) menciona que un problema común en el análisis de

excavaciones profundas en arena es que los datos de las pruebas de suelo a menudo son limitados o de baja calidad debido a la dificultad de tomar muestras de arena in situ inalteradas. Por tanto, es importante la selección correcta de los parámetros del suelo. También menciona que para realizar un análisis preciso de la deformación utilizando métodos de elementos finitos, se debe seleccionar un modelo constitutivo apropiado. Para ello, estudió dos excavaciones rectangulares en Taiwán cuyo sistema de contención implementado fue muro pantalla sostenidos por puntales de acero de sección W. Se evaluaron los movimientos del muro y el asentamiento del suelo en dos modelos: Mohr Coulomb (MC) y Hardening Soil (HS) y analizaron los parámetros de deformación de la arena in situ a través de historias de casos. En este sentido, una de las conclusiones de la investigación determina que el modelo constitutivo Hardening Soil genera resultados realistas permitiendo simular el comportamiento de pequeñas deformaciones (Khoiri et al., 2013).

En un estudio reciente de Van Nguyen et al. (2023), se investigó las respuestas sísmicas no lineales y mecanismos de daño de la excavación reforzada profunda mediante un modelo numérico tridimensional basado en pruebas centrífugas dinámicas para capturar las respuestas y daños de la estructura ante sismos. Es importante mencionar que en el estudio se adoptó un acelerograma sintético. El modelo numérico fue realizado en el software ABAQUS, el medio del suelo fue la arena, representado por el modelo de plasticidad de Mohr-Coulomb. Obtuvieron resultados de fuerzas cortantes y momentos flector en el muro, fuerzas axiales en puntales de acero observándose un incremento de estas, luego del terremoto. De igual forma, se hace una verificación de los daños por tracción y compresión de la excavación y finalmente, se presentan métodos de rehabilitación sísmica. Una de las conclusiones abarca los daños sísmicos que pueden ocurrir en paredes y puntales de concreto para lo cual recomiendan el aumento de rigidez de estos elementos; también el aumento de la intensidad del terremoto conduce a aumentos en las respuestas sísmicas de la estructura. Una de las limitantes de la investigación de Van Nguyen et al. (2023), es que el caso de estudio no presenta agua subterránea, una situación similar a la del caso de estudio de la presente investigación.

Li et al., (2023) menciona que, con el aumento de proyectos de excavación profunda en el proceso de urbanización, existe un mayor interés en proteger los edificios vecinos contra

los daños inducidos por la excavación. Por lo cual propone construir un novedoso modelo de aprendizaje profundo llamado Att-Bilstm para ofrecer una estimación confiable y dinámica de los desplazamientos verticales de edificios adyacentes en nombre del riesgo inducido por la excavación. El método híbrido de aprendizaje profundo propuesto se verificó en un proyecto de excavación real en Shanghái con lo cual contribuyó a ayudar a los gerentes a comprender completamente las condiciones de la construcción y a tomar las medidas de protección correspondientes para reducir el riesgo inducido por excavaciones futuras en edificios adyacentes.

La revisión de la literatura mostró que se han realizado estudios muy limitados para proporcionar una comprensión clara del comportamiento de excavaciones arriostradas profundas bajo cargas sísmicas (Van Nguyen et al., 2023). En este mismo sentido, aunque en los últimos dos años se ha presentado mayor aumento de investigaciones sobre el comportamiento en condiciones estáticas y dinámicas de los sistemas de contención en excavaciones profundas, la bibliografía encontrada no presenta gran información sobre el análisis de fallas locales en los elementos de estos sistemas, fallas que luego terminan en una falla progresiva generando riesgos en los proyectos.

## 1.2 Justificación

A pesar del buen comportamiento que ha tenido el sistema de contención compuesto por pilotes anclados en excavaciones profundas, existen muy pocos estudios sobre el comportamiento estático y dinámico en condiciones de fallas de algunos de sus elementos, por ejemplo, siendo los anclajes uno de los elementos principales de este sistema de contención y a pesar de que se utiliza un número cada vez mayor en la ingeniería geotécnica, los problemas relacionados con la confiabilidad a largo plazo y el rendimiento de los anclajes no se han resuelto (Zhao et al., 2018). Además, en países propensos a terremotos como Colombia un mejor entendimiento del comportamiento sísmico del sistema podría generar como resultado mejoras en los actuales procedimientos de diseño que permitan prevenir su falla y evitar daños a las estructuras cercanas existentes (Sáez et al., 2015). Es por ello que la presente investigación busca evaluar el comportamiento del sistema de contención conformado por pilotes anclados ante diferentes tipos de fallas parciales, no solo en condiciones estáticas sino también en condiciones dinámicas, a partir

de un modelo numérico calibrado con base en un caso de estudio haciendo uso del software MIDAS GTS NX.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Realizar la evaluación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por pilotes anclados ante diferentes tipos de fallas parciales a partir de un modelo numérico calibrado en condiciones estáticas y dinámicas con el software MIDAS GTS NX.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Calibrar el modelo numérico basado en las condiciones del caso de estudio.
- Someter el modelo numérico calibrado en condiciones estáticas y dinámicas a diferentes tipos de fallas parciales.
- Analizar la afectación del sistema de contención compuesto por pilotes anclados ante la falla de algunos elementos que componen el sistema de contención (pilotes, viga cabezal y anclajes).





# Capítulo 2

## 2. Marco teórico

El marco teórico presentado a continuación para el desarrollo del proyecto de sistema de contención mediante pilotes anclados comprende el marco conceptual de anclajes, viga cabezal sobre pilotes, pilotes, los principios del método de elementos finitos (MEF), el uso del Software MIDAS GTS NX, la aplicación del modelo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS-Small) y los acelerogramas sintéticos.

### 2.1 Sistema de contención mediante pilotes anclados.

El Sistema de contención mediante pilotes anclados consiste en hincar pilotes en el perímetro de una excavación, estabilizando y conteniendo taludes, así como también, asegurando las excavaciones profundas que se están desarrollando. Los diámetros de estos pilotes pueden variar entre 1.00 m a 1.20 m, con separaciones entre 3.0 m a 3.50 m, incluso pueden alcanzar profundidades superiores a los 50 m (Lacera, 2015). Dependiendo de la rigidez del suelo y de la existencia del nivel freático, la pantalla se puede conformar con pilotes separados, tangentes o secantes (Saucedo, 2015).

Su proceso constructivo suele iniciar con la perforación e introducción simultánea del encamisado por medios mecánicos, seguidamente se introduce el refuerzo del pilote y se hace vaciado y llenado de concreto, finalmente se retira el encamisado (Lacera, 2015). En cuanto al diseño de este tipo de sistema de contención, Saucedo (2015) indica que se realiza por lo general mediante métodos de equilibrio límite, de tal forma de obtener la longitud y carga necesaria de los anclajes. Posteriormente, conocidos estos valores, se calcula el sistema en un modelo de elementos finitos, con la finalidad de determinar las deformaciones máximas del muro en su etapa final y durante las etapas constructivas.

Los sistemas de pilotes anclados son muy eficientes y de última generación, su aplicación en la ingeniería civil es muy amplia siendo muy efectivos para soportar y transferir grandes cargas de estructuras, se pueden utilizar también en proyectos viales como túneles, carreteras, puentes; garantizan contener el terreno junto a una excavación de cimientos o cerca de edificaciones colindantes, y garantizan la estabilización de taludes previniendo deslizamientos de tierra (Keller, 2019), en la Figura 2-1 se puede observar las aplicaciones de los pilotes anclados mencionados anteriormente:

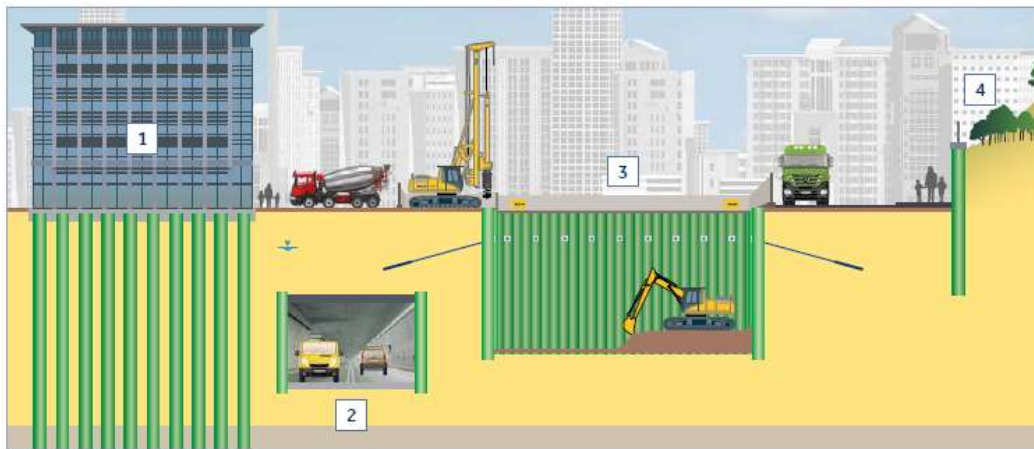


Figura 2-1. Aplicaciones de los pilotes anclados. Tomado de (Keller, 2019).

## 2.2 Anclajes.

Los anclajes usados en suelos o rocas son elementos estructurales esbeltos, diseñados para transmitir un esfuerzo de tensión desde el exterior a una zona interna firme del suelo, los anclajes restringen el desplazamiento o movimiento generado por fuerzas laterales o de levantamiento importantes del suelo (Monroy, 2007). Los anclajes pueden ser clasificados según el nivel de carga inicial, siendo activos cuando al ser instalados inmediatamente se les aplica una carga de tensado, mientras que a los pasivos se les deja una carga baja inicial, y se activarán con el movimiento del suelo (García, 2020). En cuanto a la estructura básica de un anclaje, esta consta de tres partes principales (Santamaria et al., 2019):

- Bulbo de inyección: Brinda la fuerza de anclaje.
- Longitud libre: Transfiere la fuerza de anclaje a la cabeza del ancla.
- Cabeza del anclaje: Es donde se desarrolla la longitud de tensado y se transfiere la fuerza de anclaje a la estructura.

Los anclajes se componen de acero, material que es propenso a la corrosión de diferentes tipos, en algunos de ellos, se puede llegar a manifestar una reducción en la resistencia del anclaje por degradación del material y reducción de la sección (Monroy, 2007), en este sentido, es importante tener en cuenta que se puede presentar la falla de este tipo de elementos, aun mas en casos en los que se encuentren expuestos a ambientes agresivos.

Dentro de una excavación profunda, los anclajes a diferentes profundidades son clave para restringir el desplazamiento del muro o de pilotes, debido a los empujes del suelo, el agua y sobrecargas (Rojo Pizarro, 2017). Por lo general, estos anclajes son de uso temporal, pues tienen una vida de servicio corta.

### **2.3 Cabezal sobre pilotes o viga cabezal.**

La viga cabezal, es un elemento que hace parte del sistema de contención evaluado en la presente investigación. Es un elemento en material de concreto que cumple la función de redistribuir uniformemente los empujes horizontales del suelo contra los pilotes, garantizando un comportamiento conjunto del sistema de contención (Gómez, 2016).

### **2.4 Pilotes.**

Los pilotes son elementos de concreto reforzado de gran esbeltez que además de utilizarse como fundación de una estructura se utilizan para el soporte de los empujes horizontales generados por el suelo, por lo que sirven como contención. Cuando son usados como elementos de un sistema de contención, es necesaria la realización de pantallas de pilotes, entendido como un conjunto de pilotes en el terreno, se pueden disponer de ilimitadas formas. Como se mencionó anteriormente, existen diferentes tipos de pantallas de pilotes, siendo las más utilizadas secantes, tangentes y discontinuas (Rojo Pizarro, 2017).

En las pantallas de pilotes discontinuos, la separación depende exclusivamente del tipo de terreno y al dejar suelo sin excavar entre pilotes se tiene que este trabaja por efecto arco, permitiendo la estabilidad de este (Rojo Pizarro, 2017). Por lo general, se utilizan en suelos cohesivos de buena calidad sin presencia de aguas, ya que en estos casos los empujes no son de gran consideración (Saucedo, 2012).

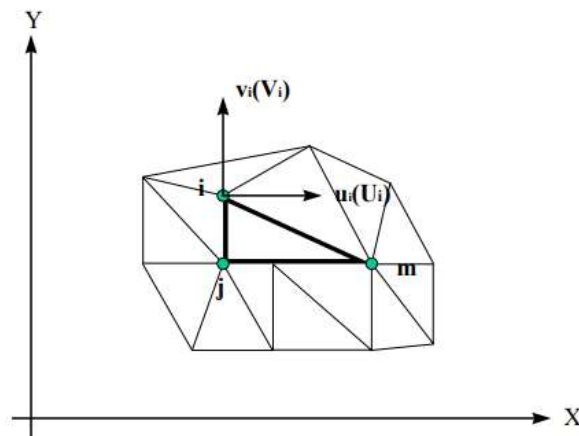
Las pantallas de pilotes tangentes tienen un punto de contacto, generando líneas tangenciales, mientras que, en las pantallas de pilotes secantes, los pilotes son construidos

uno sobrepuesto del otro, por tal razón, se usan en suelos con presencia de agua (Rojo Pizarro, 2017).

## 2.5 Método de elementos finitos (FEM)

El cálculo estructural en los últimos años ha desarrollado un importante avance gracias a la implementación de nuevas herramientas matemáticas que trasladadas al desarrollo informático han permitido desarrollar y obtener resultados de problemas tan complejos (Cándido, 2017). Una de las herramientas matemáticas empleadas para el análisis de la ingeniería de cuerpos complejos es el Método de elementos finitos (FEM), que se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, dividiéndolo en un número finito de partes que se denomina “elementos” cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos que se denominan “nodos”, de esta forma el comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación de los valores conocidos de los mismos nodos, en este sentido, se obtiene una aproximación de los valores del problema complejo a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos (Frías Valero, 2004).

Como se observa en la Figura 2-2, el elemento finito  $e$  viene definido por sus nodos ( $i$ ,  $j$ ,  $m$ ) y su contorno de líneas que lo unen, los desplazamientos  $u$  se aproximan por un vector, así se puede conocer el valor parámetro dentro del elemento a partir de los valores de los nodos (Frías Valero, 2004).



**Figura 2-2.** Coordenadas nodales ( $i$ ,  $j$ ,  $m$ ) y desplazamientos de los nodos. Tomado de (Frías Valero, 2004).

El método de elementos finitos se ha comenzado a implementar en la geotecnia debido a que los análisis se ven afectados por una gran incertidumbre, existen diferentes factores que generan impacto en el comportamiento de los cuerpos como el tipo de material del suelo, que es de origen natural y heterogéneo, la realidad topográfica y geológica del lugar que influyen directamente en su comportamiento, por lo anterior no es posible realizar un análisis con un modelo lineal basado en métodos números (Pineda-Contreras et al, 2013).

En los análisis estructurales con MEF en geotecnia, los resultados se ven afectados por la incertidumbre asociada a parámetros como el módulo de deformación. Las principales fuentes que dificultan la determinación de este parámetro son:

- a) La variabilidad espacial de las propiedades del suelo que depende principalmente de la historia geológica de formación del suelo y, en su caso, del procedimiento constructivo. La evaluación de esta variabilidad está condicionada por la cantidad de información obtenida en la exploración geotécnica.
- b) Errores aleatorios y sistemáticos, los primeros se cometen durante la realización de las pruebas de laboratorio; los segundos se deben a un sesgo en la medición, producido, por ejemplo, por el remoldeo de muestras o por el uso de correlaciones aproximadas entre propiedades físicas y mecánicas (Pineda-Contreras et al, 2013).

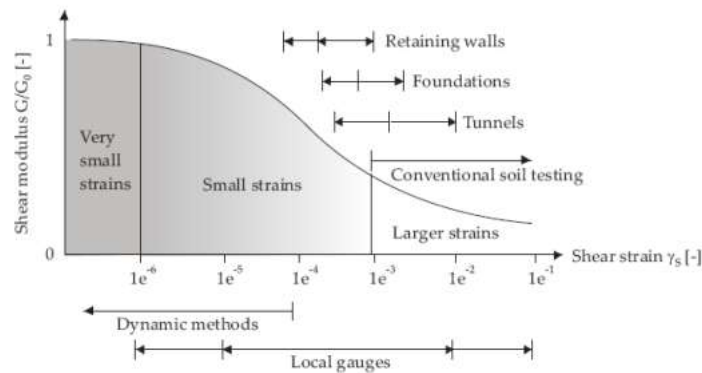
## 2.6 Software MIDAS GTS NX.

Los grandes retos de proyectos en infraestructura que requieren análisis geotécnicos avanzados y complejos se podrán ejecutar sin limitaciones, con certeza y con confiabilidad gracias al auge informático que han permitido el desarrollo software como Midas GTS NX, que considera métodos confiables para el cálculo y el análisis de diferentes elementos y problemas de geotecnia. Adicional a lo anterior, la interfaz del software Midas GTS NX permite visualizar los resultados por medio de representaciones de animaciones, tablas, gráficos y otras herramientas que ayudan a comprender e interpretar con mayor facilidad todos los resultados y aspectos del proyecto (*MIDAS GTS NX - Software análisis geotécnicos 2D y 3D, s. f.*).

## 2.7 Modelo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS-Small)

El modelo original de Hardening Soil (HS) asume un comportamiento elástico del material durante la descarga y recarga, sin embargo, el rango de deformación en qué el suelo puede considerarse verdaderamente elásticos, es decir, donde se recuperan casi por completo del

esfuerzo aplicado, es muy pequeño, tanto así, que, con el incremento de la amplitud de la deformación, la rigidez del suelo decae de forma no lineal. La Figura 2-3 ilustrada a continuación muestra una gráfica de dicha curva de reducción de rigidez, donde muestra el comportamiento característico de rigidez-deformación del suelo con características típicas de rangos de deformación para pruebas y estructuras de laboratorio (Herold et al, 2009).



**Figura 2-3.** Comportamiento característico rigidez-deformación del suelo con rangos de deformación típicos para laboratorio y estructuras. Tomado de (Herold et al, 2009).

Sin embargo, una característica del comportamiento del suelo que aún faltaba en el modelo Hardening Soil (HS) es la alta rigidez en niveles de tensión pequeños, inclusive en problemas de ingeniería la rigidez a pequeñas deformaciones puede desempeñar un papel importante. Es generalmente sabido que los modelos convencionales o tradicionales sobrepredicen el empuje en los problemas de excavación y geotecnia, estos modelos también predicen en exceso el ancho y predicen en menor medida el gradiente del valle de asentamiento detrás de las excavaciones y por encima de los túneles. La rigidez de tensión pequeña puede mejorar esto, además, la rigidez de tensión reducida puede utilizarse para modelar el efecto de la conservación de las propiedades de los materiales en aplicaciones que implican carga cíclica y comportamiento dinámico. El modelo HS small es adecuado para el análisis de tareas tanto estáticas como dinámicas (Herold et al, 2009).

Las características avanzadas del modelo HS small son más evidentes en condiciones de carga de trabajo, aquí el modelo da desplazamientos más fiables que el modelo HS cuando se utiliza en aplicaciones dinámicas, el modelo HS small también introduce propiedades de los materiales. Por lo tanto, este modelo es especialmente adecuado para el análisis de estructuras dúctiles, tanto para aplicaciones estáticas como dinámicas. Los parámetros de

los materiales del modelo HS small pueden obtenerse mediante la realización de pruebas de laboratorio clásicas, es decir, pruebas triaxiales. (Herold et al, 2009).

## 2.8 Acelerogramas sintéticos

Los códigos o normas internacionales de construcción sísmica definen la carga sísmica mediante espectros de diseño, y cuando se llevan a cabo análisis sísmicos, como el que se espera realizar en la presente investigación, las historias temporales del movimiento del suelo deben representar adecuadamente la carga sísmica definida por los espectros de diseño (Zentner, 2014). Teniendo en cuenta, la imposibilidad que se puede presentar en la obtención de datos de registros sísmicos en un sitio determinado se hace necesario la generación de acelerogramas sintéticos.

El acelerograma es un registro de la variación de la magnitud de la aceleración del terreno en un sitio dado en función del tiempo (Piedra, 2018), en este sentido, los acelerogramas sintéticos deberán ser compatibles con el espectro de respuesta elástico que representa las acciones sísmicas de diseño en el lugar de estudio. La generación de registros artificiales presenta ventajas tales como la posibilidad de realizar un análisis temporal del comportamiento de las estructuras, lo cual es fundamental en los modelos no lineales; y la posibilidad de estimar la demanda sísmica en aquellas zonas donde no se cuenta con bases de datos de eventos sísmicos (Silva, 2017).

Según Silva (2017), existen diferentes métodos de generación de acelerogramas sintéticos, como el método empírico, en el que se extrapolan temporalmente características de los terremotos, tales como su duración, intensidad, aceleración máxima, entre otros, a través de un análisis estadístico. También existen los métodos de fundamentos físicos desconocidos en el que se busca replicar algunas de las características físicas del sismo, tales como su magnitud, duración o intensidad; los métodos físicos, que se basan en el uso de las ecuaciones que rigen la generación de los terremotos y la propagación de ondas sísmicas a través de la corteza terrestre y de las capas superficiales de suelo; y métodos más recientes como los híbridos, que combinan distintos métodos para modelar distintos rangos de frecuencias de la propagación de ondas. De igual forma, existe en la bibliografía muchos otros métodos que se desprenden de los mencionados y que han sido abarcados por diferentes autores.



### 2.8.1 Software AcelSin.

AcelSin es un software creado por el ingeniero de caminos José Antonio Agudelo Zapata. Este software facilita la generación de acelerogramas sintéticos en función de los espectros y la función de intensidad. El programa cuenta con un manual de usuario en el que se detalla la base teórica del AcelSin y su funcionamiento.

El software usa el método propuesto por Gasparini y Vanmarcke, basado en posibilidad de expandir la aceleración  $\ddot{x}(t)$  de la señal sísmica en una serie de ondas sinusoidales (ver Ecuación 2.1).

$$\ddot{x}(t) = I(t) \sum_{i=1}^n A_i * \sin(\omega_i * t + \phi_i) \quad (2.1)$$

donde  $\phi_i$ ,  $\omega_i$  y  $A_i$  son un conjunto de ángulos de fase, frecuencias y amplitudes respectivamente.  $I(t)$  es una función de intensidad envolvente, determinista, predefinida y que permite simular el carácter transitorio de los acelerogramas (Agudelo Zapata, 2014).

# Capítulo 3

## 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología llevada a cabo para evaluar el comportamiento de la estructura de contención compuesta por pilotes anclados ante diferentes tipos de fallas parciales (análisis estático) y ante diferentes tipos de sismo (análisis dinámico). El caso de estudio se muestra en la Figura 3-1 y corresponde a la excavación del edificio Parque Oriente, ubicado en la comuna de Las Condes, Santiago de Chile (Salas et al., 2019). La excavación alcanzó 21.2 m de profundidad y fue contenida mediante el sistema de pilotes distanciados a 3.2 m entre ejes, con una longitud de empotramiento de 2.0 m y arriostrados mediante dos líneas de anclajes temporales.



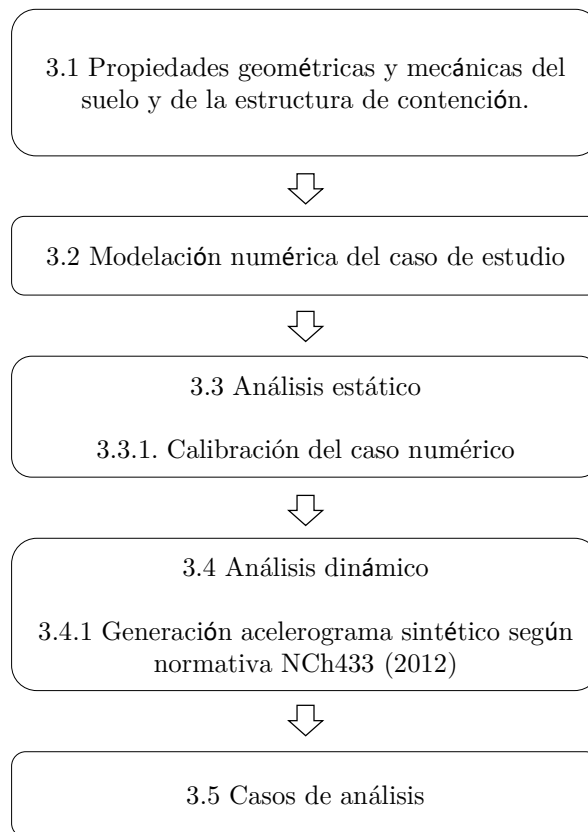
**Figura 3-1.** Ejemplo de excavación sobre pilotes realizada en grava de Santiago. Tomado de (Salas, 2018).

Con el fin de representar el caso de estudio, se seleccionó el software MIDAS GTS NX para análisis geotécnicos 2D y 3D basado en el método de elementos finitos, el cual permite tener una noción clara del comportamiento real que tendrá la estructura de contención ante los diferentes tipos de falla a los que se espera someter. De igual forma, este software permite realizar el análisis por medio de etapas constructivas representando de una forma

más real las deformaciones y así compararlas con las mediciones en campo tomadas con el inclinómetro por el ingeniero Felipe Salas.

Para el análisis dinámico se sometió el modelo a un acelerograma sintético generado con el software AcelSin y el cual es representativo con lo que establece la norma de diseño sísmico chilena NCh433 (2012), pues la ciudad de Santiago pertenece a la zona II, lo que implica que se espera una máxima aceleración efectiva ( $A_0$ ) igual a 0.3g.

En la Figura 3-2 se aprecia la metodología que tuvo lugar para el análisis del caso de estudio, de igual manera se procede a describir en que consistió cada uno de los numerales.



**Figura 3-2.** Metodología desarrollada para el análisis del caso de estudio.

### 3.1. Propiedades geométricas y mecánicas del suelo y de la estructura de contención.

Como se mencionó anteriormente, el caso de estudio se basó en la excavación del edificio Parque Oriente realizada en Santiago de Chile, y que fue objeto de estudio en la tesis del ingeniero Felipe Salas. Esta investigación consistió en dos etapas, la primera llevó a cabo una toma de mediciones de las deformaciones a través de inclinómetros. La segunda, consideró una etapa de caracterización en laboratorio a partir de una muestra de suelo.

En este sentido, las propiedades geométricas y mecánicas del suelo y de los elementos constructivos que componen la estructura de contención a evaluar en la presente investigación fueron los siguientes:

#### 3.1.1. Propiedades geométricas y mecánicas del suelo.

La excavación se realiza sobre la deposición Mapocho que corresponde a la zona norte de la una unidad geológica de origen fluvial conocida como Grava de Santiago y que se caracteriza por presentar una cota de nivel freático por debajo de los 50 m de profundidad, situación que es adecuada para la estructura de contención empleada en la presente investigación.

Luego de una serie de ensayos con las muestras del suelo tomadas, fue posible distinguir 2 estratos:

- Estrato 1: Denominada segunda deposición, desde la cota cero hasta los 11.3 m de profundidad.
- Estrato 2: Denominada primera deposición, donde se alcanzó una velocidad de propagación de onda de corte cercana a 900 m/s (roca) a los 33 m de profundidad (Salas et al., 2019).

Ambos estratos contienen una distribución granulométrica y propiedades de índice similares y se definen por gravas areno-arcillosas bien graduadas (GW-GC), de compactación alta y con partículas de más de 90 mm de tamaño máximo, de igual forma el contenido de finos varía entre 2-3% con un índice de plasticidad entre 5 y 20.

El suelo será representado por el modelo constitutivo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS - Small) ya que permite simular el comportamiento esfuerzo-

deformación de una forma no lineal hiperbólica, pronosticando de forma más realista las deformaciones inducidas. En la Tabla 3-1 se da a conocer los parámetros considerados para cada una de las deposiciones.

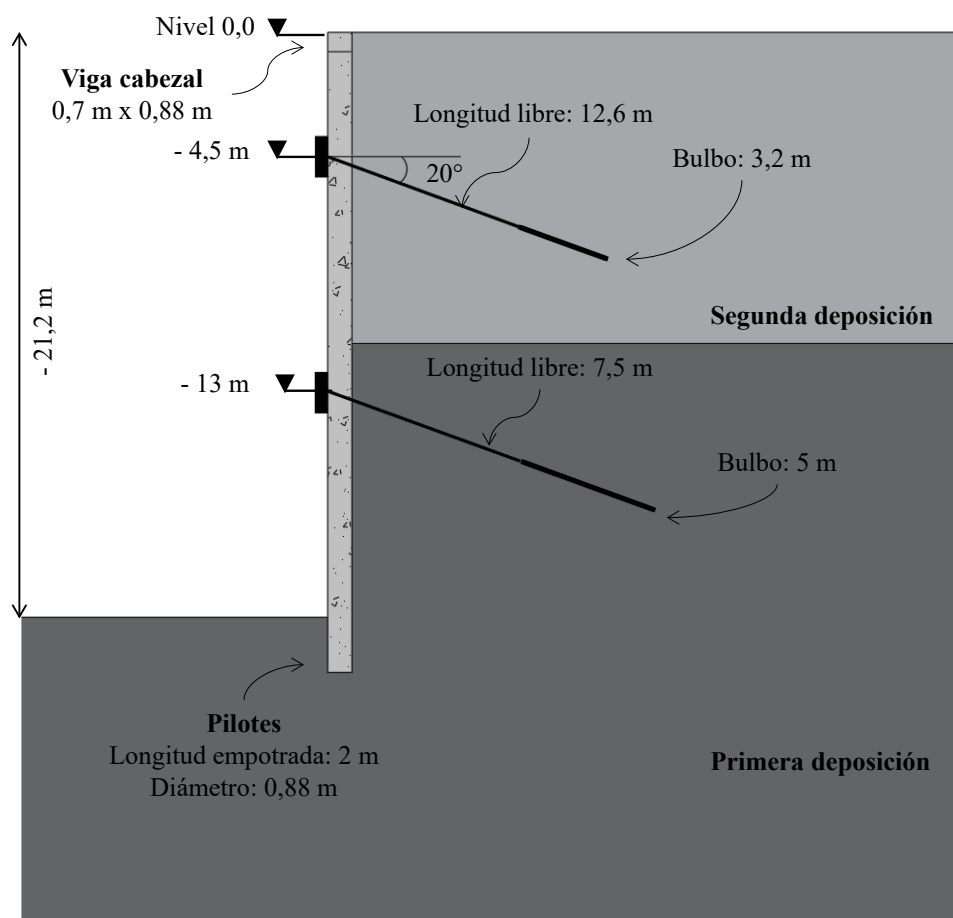
Parámetro	Unidad	Estrato 1: Segunda deposición	Estrato 2: Primera deposición
$m$	–	0.55	0.51
$E_{50}^{ref}$	KPa	80000	275000
$E_{oed}^{ref}$	KPa	130000	190000
$E_{ur}^{ref}$	KPa	350000	900000
$G_o^{ref}$	KPa	400000	750000
$\gamma_{0,7}$	–	0.000008	0.0011
$c'$	KPa	15	35
$\emptyset$	°	45	45
$\psi$	°	10	15
$v_{ur}$	–	0.3	0.2
$R_f$	–	0.9	0.9
$K_o^{nc}$	–	0.5	0.43
$e$	–	0.15	0.15
$\gamma'$	Kn/m <sup>3</sup>	22	22.5

Tabla 3-1. Parámetros de la deposición 1 y deposición 2 usando HS-small.

### 3.1.2. Propiedades geométricas y mecánicas de la estructura de contención.

La estructura de contención a evaluar se compone por los siguientes elementos: anclajes, pilotes y viga cabezal. Estos elementos cuentan con propiedades mecánicas que atienden las características del suelo y cada uno es representado por medio de un modelo isotrópico elástico lineal asegurando que las propiedades no varíen con la dirección y se mantengan

las suposiciones de linealidad y elasticidad, es decir, que la respuesta inducida sea proporcional a la carga que se aplique y que los elementos no sufran deformaciones permanentes.



**Figura 3-3.** Dimensiones de los elementos de la estructura de contención.

En la Figura 3-3 se presenta un esquema de los elementos de la estructura de contención. En cuanto a las propiedades geométricas la viga cabezal considerada para este sistema cuenta con geometría rectangular cuyo espesor es de 0,88 m y la altura es de 0,7 m. Los pilotes, como se ha mencionado en la introducción de este capítulo, se encuentran separados a una distancia de 3,2 m (distancia medida entre ejes) y cuentan con diámetro de 0,88 m, longitud libre de 21,2 m y longitud de empotramiento de 2 m, para una longitud total de 23,2 m. Tanto la viga cabezal como los pilotes cuentan con las mismas propiedades mecánicas descritas en la Tabla 3-2.

Parámetro	Unidad	Viga cabezal y Pilotes
$E$	$KPa$	30000000
$\nu$	–	0.2
$\gamma'$	$Kn/m^3$	24

**Tabla 3-2.** Propiedades mecánicas de la viga cabezal y los pilotes.

En cuanto a los anclajes, se implementaron del tipo activo, mediante dos líneas, cada una de cinco o diez anclajes, según el modelo en condiciones dinámicas o estáticas, respectivamente. Los anclajes tuvieron una tensión inicial y una tensión final, tal y como se muestra en la Tabla 3-3. La primera línea de anclajes fue instalada a los 4.5 m de profundidad, la longitud libre de estos cuenta con una longitud de 12.3 m, un diámetro de 0.0327 m y el bulbo de 3.2 m de longitud; para la segunda línea de anclajes instalada a los 13 m de profundidad, se implementó una longitud libre de 7.5 m de diámetro 0.0383 y un bulbo de 5 m. Los bulbos en ambas filas de anclajes cuentan con un diámetro de 0.15m.

En la Tabla 3-4 se muestran los parámetros usados en el modelo para los anclajes.

Línea de anclajes	Tensión inicial (KN)	Tensión final (KN)
1	550	880
2	350	1245

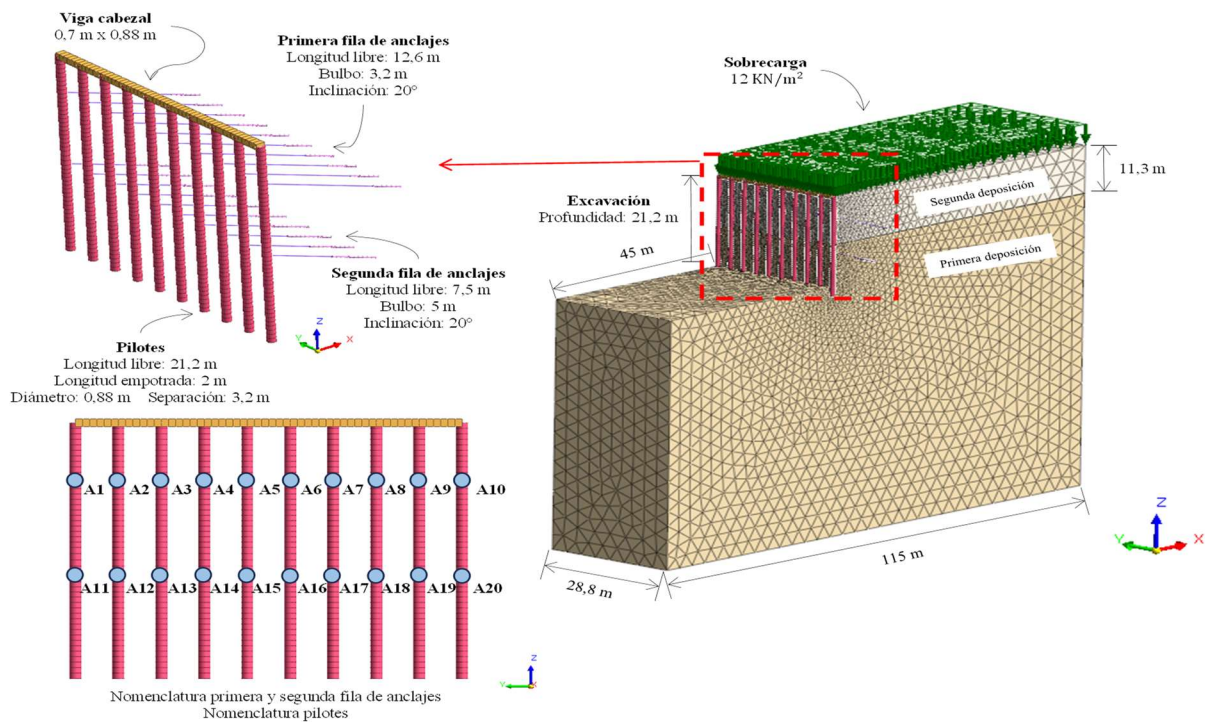
**Tabla 3-3.** Tensiones iniciales y finales establecidas en las filas de anclajes.

Parámetro	Unidad	Longitud libre	Bulbo
$E$	$KPa$	191000000	2500000
$\nu$	–	0.27	0.3
$\gamma$	$Kn/m^3$	78	21

**Tabla 3-4.** Parámetros establecidos para los anclajes.

### 3.2. Modelación numérica del caso de estudio.

Durante la excavación de suelos en una excavación profunda, las tensiones y deformaciones tanto de las estructuras de contención como de los suelos son bastante complejas (Zhao et al., 2018), por tanto, se empleó con base en el método de elementos finitos, el software MIDAS GTS NX que permite simular el comportamiento estático y dinámico del material mediante modelos tridimensionales (3D) que tienen las características que se observa en la Figura 3-4, correspondiente al modelo numérico sometido a fallas parciales de los elementos en condiciones estáticas, y la Figura 3-5, que corresponde al modelo numérico sometido a fallas parciales de los elementos en condiciones dinámicas. Ambos, contaron con las misma longitud y altura (115 m x 80 m), sin embargo, se estableció una diferencia en el espesor, pues el modelo sometido a condiciones estáticas consideró un total de 10 pilotes, con el fin de obtener una visión más amplia que permitiera establecer diferentes casos a evaluar; mientras que el modelo sometido a condiciones dinámicas se evaluó considerando un total de 5 pilotes considerando el tiempo y el recurso de computo al tratarse de un modelo dinámico en 3D.



**Figura 3-4.** Caso de estudio modelado en MIDAS GTS NX para análisis en condiciones estáticas.



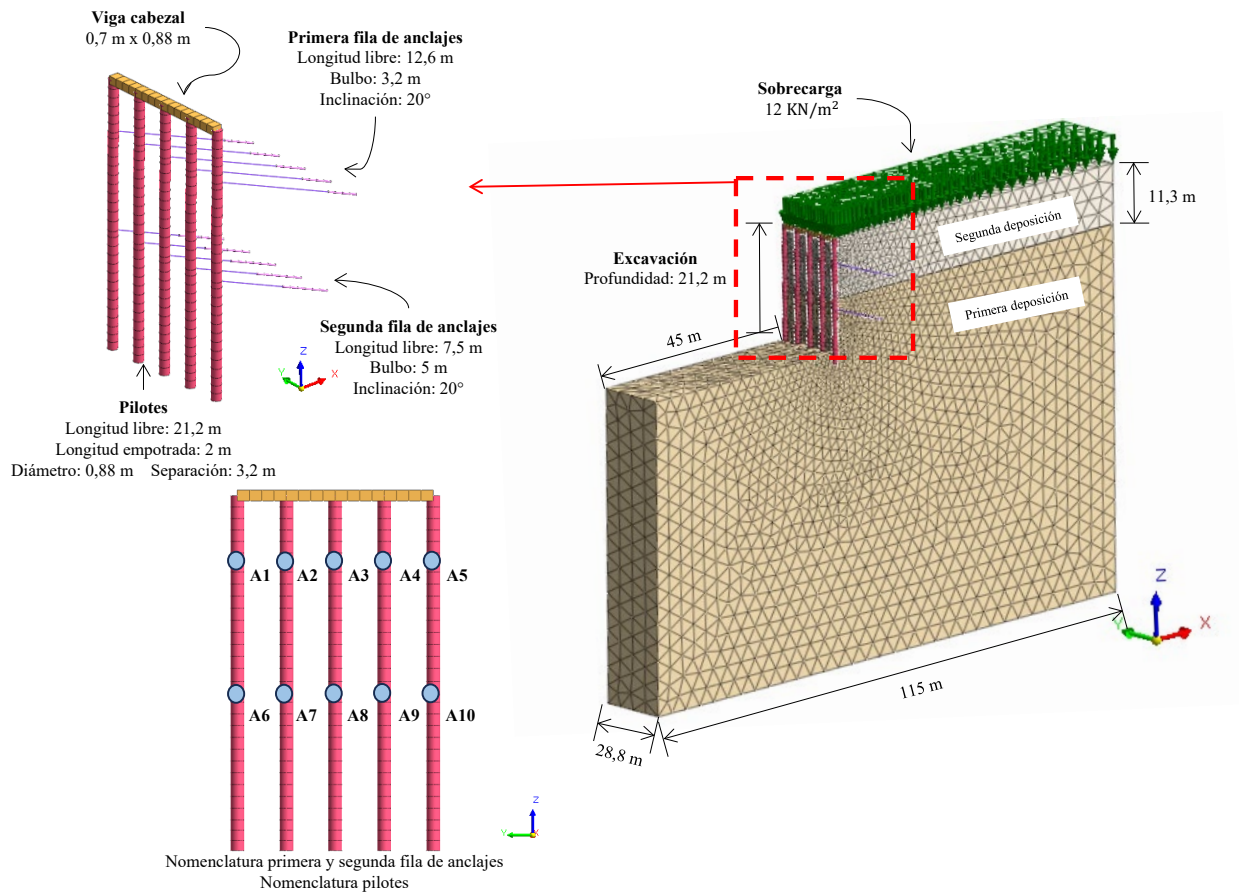


Figura 3-5. Caso de estudio modelado en MIDAS GTS NX para análisis en condiciones dinámicas.

En el software MIDAS GTS NX, a través de un modelo bidimensional (2D) se estableció a 45 m el límite izquierdo, extensión correspondiente a la zona de excavación, se completan 115 m en el eje x con la finalidad de tener terreno fuera de la influencia de la excavación; configurando las demás dimensiones, al igual que los estratos del suelo y posiciones de las dos filas de anclajes y los pilotes, se definió el modelo geométrico, y a partir de este, se generaron sólidos según los espesores para las diferentes condiciones, y se obtuvo de esta forma un plano de trabajo tridimensional (3D).

Las propiedades de los materiales se definieron con base en los datos establecidos en la tesis del ingeniero Felipe Salas (Fontecilla et al., 2018); para las deposiciones, mediante

la asignación de un material isotrópico y como ya se ha indicado, se utilizó el modelo constitutivo Hardening Soil – (Small strain stiffness), que considera la rigidez al corte y a la compresión. La longitud libre de los anclajes se creó como un elemento Embedded Truss en el que se ignora el comportamiento de flexión y no requiere conectividad nodal. Los bulbos se crearon como elemento Truss definidos por dos nodos para que estén en contacto con el estrato, transmiten solo fuerzas axiales y puede combinarse con funciones de solo tensión o solo compresión. Finalmente, los pilotes se crearon como un elemento Beam.

Fue necesario establecer un control de mallas implantando un sembrado de nodos en los elementos 1D (pilotes, anclajes y viga cabezal) y las deposiciones, para que al momento de generar la malla se respetara el sembrado y esta fuera más fina en la pared de la excavación y tuviera un comportamiento gradual hacia las fronteras laterales. La malla usada fue de tipo triangular, el tamaño más pequeño fue de 0.5 m y el más grande de 3.5 m.

### 3.3. Análisis estático.

Teniendo en cuenta que en la presente investigación se realizó un análisis estático, se establecieron las condiciones de fronteras, restricciones y aplicaciones de cargas a tener en cuenta. Inicialmente, se restringió los desplazamientos horizontales en los bordes laterales y los desplazamientos verticales y horizontales en el borde inferior, es decir en la base del modelo; en este sentido, se permitieron todos los movimientos hasta el borde superior.

Las cargas que actuaron fueron la carga de gravedad con base en el peso de los materiales y una sobrecarga que simula que la estructura vecina es una calle adyacente, con un valor de 12 KN/m<sup>2</sup> (Fontecilla et al., 2018). Para los pilotes fue necesario generar una restricción de rotación sobre el eje Z. Se ingresó en el modelo una tensión inicial y una tensión final en cada uno de los anclajes con la opción Prestress.

Finalmente, se definió la secuencia de las diferentes etapas que se presentan en la Tabla 3-5, las cuales simulan el proceso constructivo de la excavación profunda. Debido a que también se realizó un análisis dinámico el tipo de análisis implementado fue el de esfuerzo y de tiempo historia no lineal (stress – Nonlinear Time History). La simulación de cada elemento estructural se hizo mediante la activación o desactivación en cada una de las etapas.

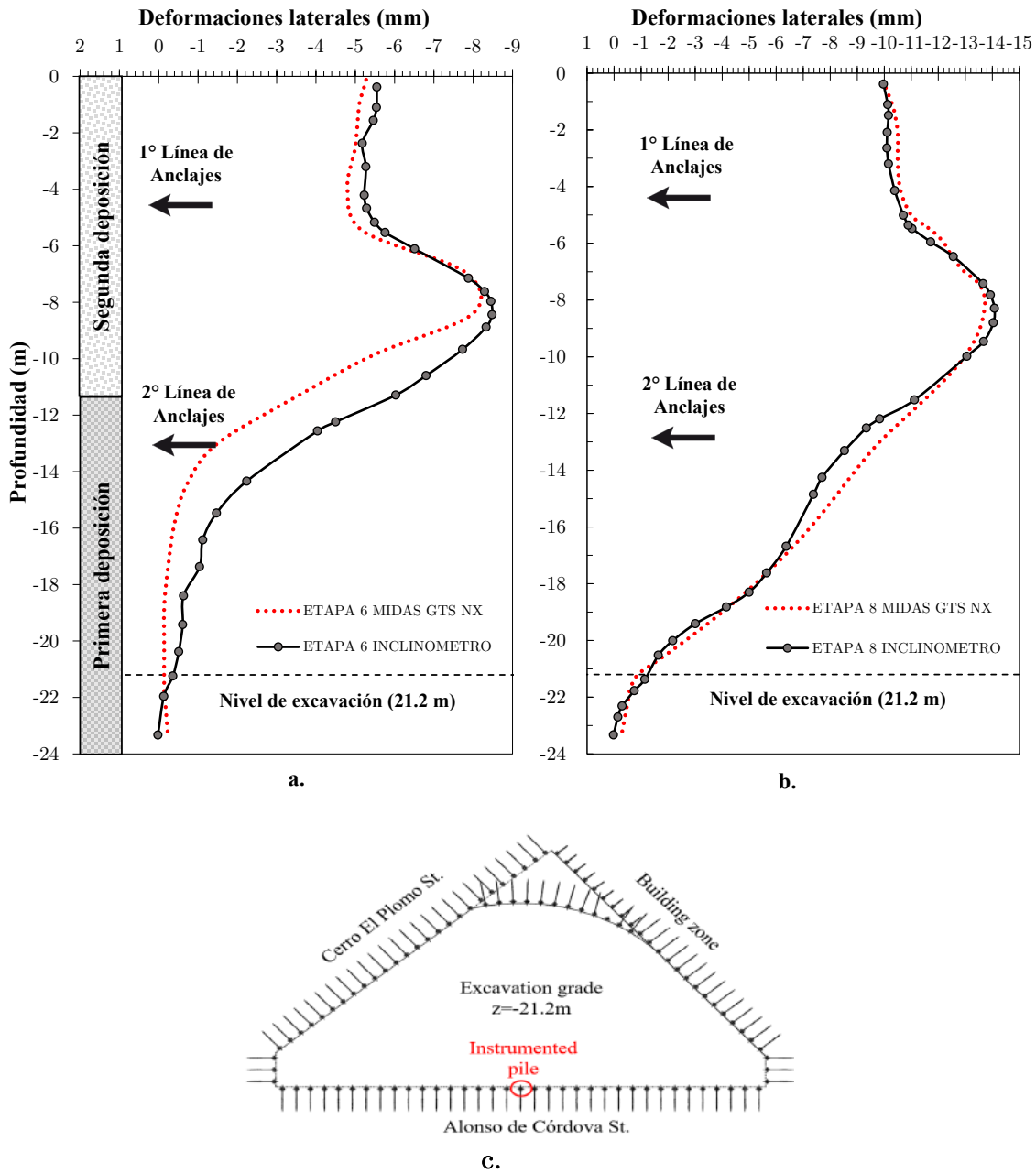
Etapa	Nombre	Profundidad	Descripción
1	Condiciones iniciales	0 m	Se consideran las capas de suelos que representan la excavación, deposición 1 y deposición 2.
2	Sobrecarga	0 m	Carga que simula una calle adyacente.
3	Pilotes	0 m	Instalación de los pilotes.
4	Excavación 1 (5 m)	-5 m	Primera etapa de la excavación.
5	Anclaje 1	- 4,5 m	Instalación de la primera línea de anclajes, se considera la tensión inicial.
6	Excavación 2 (13,5 m)	- 13,5 m	Segunda etapa de la excavación, se considera la tención final de la primera línea de anclajes.
7	Anclaje 2	- 13 m	Instalación de la segunda línea de anclajes, se considera la tensión inicial.
8	Excavación 3 (21,2 m)	-21,2 m	Última etapa de la excavación, se considera la tención final de la segunda línea de anclajes.

**Tabla 3-5.** Etapas del sistema constructivo establecidas para el modelo de análisis en condiciones estáticas.

### 3.3.1. Calibración del caso de análisis.

Para la representación precisa del comportamiento del suelo, es necesario un modelo con un mecanismo de endurecimiento isotrópico que no sobreestime la rigidez del suelo y por ende las deformaciones del suelo, ya que dicho comportamiento, influye en la magnitud de las fuerzas que actúan sobre los elementos estructurales que componen el sistema de contención (Omar González-Cueto et al., n.d.). Por lo anterior, con ayuda del software MIDAS GTS NX se realizó la simulación del comportamiento esfuerzo-deformación de la grava de Santiago y fue representada por medio del modelo constitutivo Hardening soil para pequeñas deformaciones (Small strain stiffness) que permitió la predicción más realista las deformaciones inducidas en los pilotes. Los datos de entrada son los descritos

en el numeral 3.1. y se verifico la precisión del modelo en la excavación a los 13.5 m y 21.2 m de profundidad, es decir, la etapa 6 y 8 del proceso constructivo.



**Figura 3-6.** a) Deformaciones registradas para la etapa 6. b) Deformaciones registradas para la etapa 8 y c) Trazado de la excavación con pilote instrumentado n° 13. Tomado de (Salas, 2018).

La Figura 3-6 a) y Figura 3-6 b) muestra una comparación entre las deformaciones laterales de los pilotes medidas con el inclinómetro y los valores que fueron calculados en MIDAS GTS NX para la etapa 6 y la etapa 8. Se puede concluir que las curvas de desplazamiento lateral a lo largo de los pilotes están bien reproducidos por el modelo constitutivo seleccionado y el modelo numérico. La Figura 3-6 c) presenta una imagen en planta de la zona de excavación del proyecto de excavación del edificio Parque Oriente, ubicado en la comuna de Las Condes, Santiago de Chile.

### 3.4. Análisis dinámico.

Para el análisis dinámico, el software MIDAS GTS NX nos permite implementar el método de análisis de tiempo historia no lineal, con el cual se tiene en cuenta la no linealidad de material y se pueden obtener resultados realistas sobre la respuesta del suelo frente a la aplicación de una carga sísmica.

Inicialmente, fue necesario obtener los dos modos con mayor participación de masa, esto se realizó mediante un análisis de valor propio (eigenvalue) que proporciona propiedades dinámicas de una estructura resolviendo la ecuación característica compuesta por una matriz de masa y una matriz de rigidez (Eigenvalue Analysis control, 2001). Para ejecutar el análisis de eigenvalue, se creó primero, una condición de frontera de campo libre en los bordes laterales que impide que la onda se refleje y segundo, una frontera inferior para restringir los desplazamientos en los ejes x, y y z. Con estas condiciones se obtienen los periodos de los dos modos con mayor participación de masa.

Luego, se requirió una condición de frontera denominada Ground Surface Spring que se utiliza principalmente para considerar las condiciones de soporte elástico de subrasantes en el análisis de cimientos o estructuras subterráneas (Eigenvalue Analysis control, 2001); esta condición se aplicó en las mallas que representan la deposición 1 y la deposición 2 luego de que se ha realizado la excavación.

En el numeral 3.4.1. del presente capítulo se menciona la obtención de las señales sintéticas creadas a partir del software AcelSin; estas señales fueron integradas en el software MIDAS mediante la función “ground acceleration”, los datos de tiempo son ingresados en segundos (s) y los datos de aceleración en unidad de fuerza gravitacional (g). Finalmente,

se tuvo en cuenta la carga dinámica de gravedad que parte de la carga creada para condiciones estáticas.

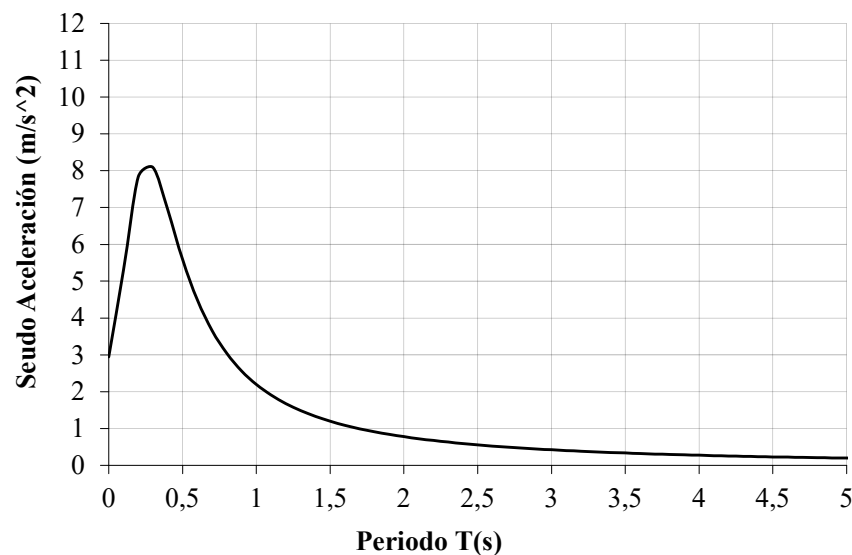
Con la configuración descrita, se incluyeron dos nuevas etapas constructivas como se muestra en la Tabla 3-6. La etapa denominada “nula” permite reestablecer los desplazamientos en los elementos generados durante las etapas en condiciones estáticas, pues se pretende evaluar el sistema una vez realizada la excavación. En la etapa denominada “THNL” se activaron todas las cargas creadas en el presente numeral, al igual que el peso propio dinámico y la señal. Para que el archivo de salida no fuera tan grande se configuró de tal forma que se guardaran resultados cada 5 incrementos.

<b>Etapas</b>	<b>Nombre</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Descripción</b>
1	Condiciones iniciales	0 m	Se consideran las capas de suelos que representan la excavación, deposición 1 y deposición 2.
2	Sobrecarga	0 m	Carga que simula una calle adyacente.
3	Pilotes	0 m	Instalación de los pilotes.
4	Excavación 1 (5 m)	-5 m	Primera etapa de la excavación.
5	Anclaje 1	- 4,5 m	Instalación de la primera línea de anclajes, se considera la tensión inicial.
6	Excavación 2 (13,5 m)	- 13,5 m	Segunda etapa de la excavación, se considera la tensión final de la primera línea de anclajes.
7	Anclaje 2	- 13 m	Instalación de la segunda línea de anclajes, se considera la tensión inicial.
8	Excavación 3 (21,2 m)	-21,2 m	Última etapa de la excavación, se considera la tensión final de la segunda línea de anclajes.
9	Nula	-	Restablecimiento de los desplazamientos.
10	THNL	-	Se consideran las cargas dinámicas y las señales sísmicas sintéticas.

**Tabla 3-6.** Etapas del sistema constructivo establecidas para el modelo de análisis en condiciones dinámicas.

### 3.4.1. Generación acelerograma sintético según normativa NCh433 (2012).

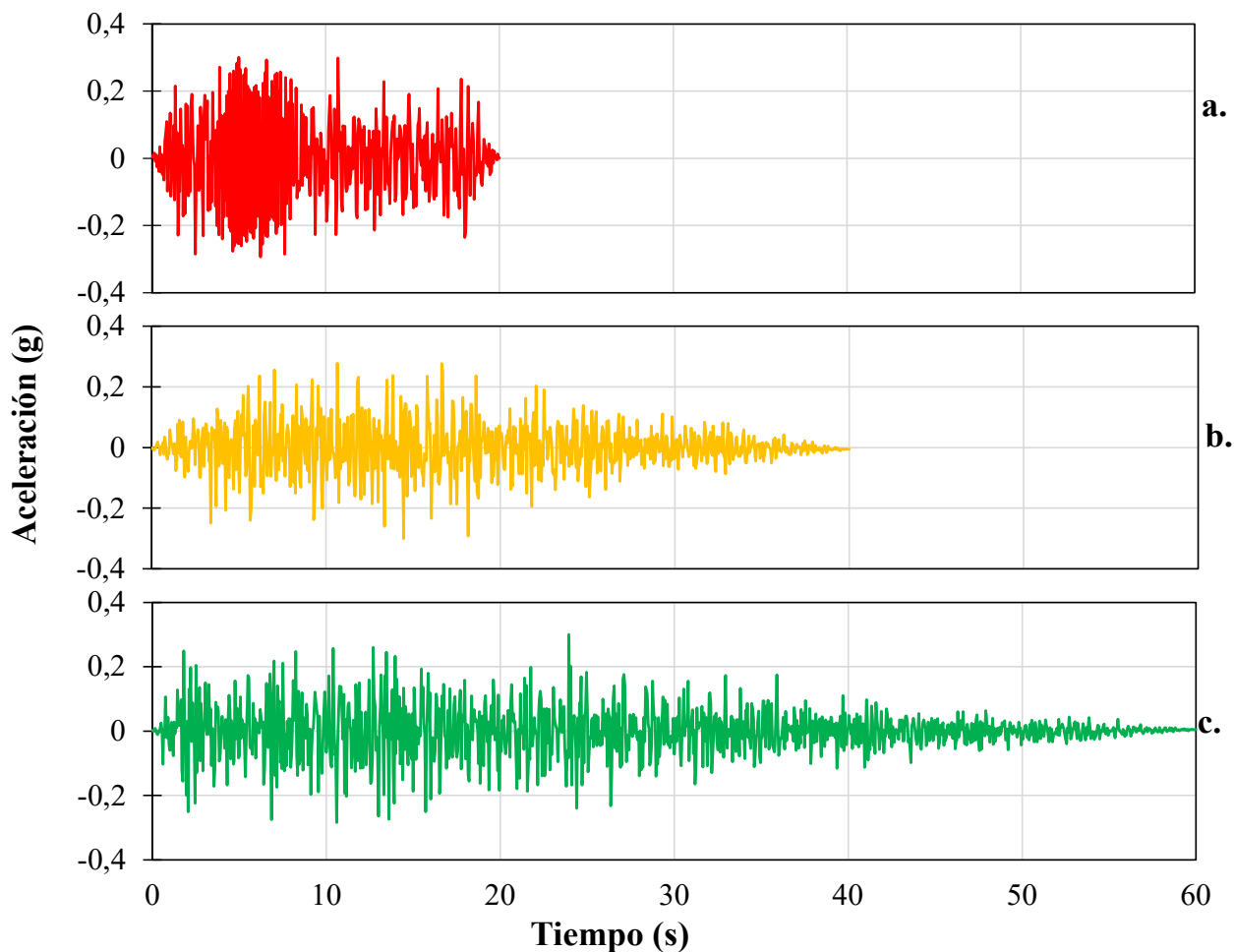
Según la norma de diseño sísmico chileno NCh433.Of1996 modificada en 2012 (NCh433, 2012), la ciudad de Santiago de Chile cuenta con una aceleración efectiva de 0.3g, pues se ubica en la zona II de las tres divisiones de acuerdo con este parámetro. Teniendo en cuenta que es necesario obtener una señal que represente las condiciones sísmicas del sitio en estudio, se generó inicialmente el espectro de diseño representado en la Figura 3-7, con base en el código chileno, en el cual, según la velocidad de corte a los 30 m de profundidad, se obtiene un suelo tipo “B”, roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme (NCh433, 2012). El espectro también depende de otros parámetros como la zona sísmica de la estructura, el sistema y material estructural, categoría del edificio y el periodo de vibración modal (Rojas José S., 2012).



**Figura 3-7.** Espectro de diseño para Santiago de Chile zona II, suelo B. Según NCh433.Of1996 modificada en 2012.

A partir de los datos del espectro de diseño obtenido y que cumple con las condiciones sísmicas del sitio en estudio y la normatividad, se hizo uso del software AcelSin para poder originar un acelerograma sintético. Este software se basa en el método de Gasparini y Vanmarcke (1979), que genera una función de densidad espectral a partir del espectro de respuesta objetivo, para posteriormente derivar señales sinusoidales con amplitudes aleatorias (Flores López & Ayez Zamudio, 2018).

Como en la presente investigación se pretende simular el sistema de contención de pilotes anclados ante diferentes tipos de sismos, y de acuerdo con lo descrito anteriormente, se obtienen las tres señales sísmicas sintéticas (también llamados acelerogramas sintéticos) de la Figura 3-8, en donde a. corresponde a una señal con duración de 20 segundos, b. a una duración de 40 segundos y c. a una duración de 60 segundos.



**Figura 3-8.** Señales sintéticas para a) 20 segundos, b) 40 segundos y c) 60 segundos en una frecuencia de muestreo de 20 HZ.

En la Figura 3-9, se presenta una comparación de la gráfica de espectro de diseño generada con la norma de diseño sísmico chileno NCh433.Of1996 modificada en 2012 y los espectros de aceleraciones de las señales sísmicas sintéticas obtenidas con el software AcelSin.



Es importante mencionar que con base en la bibliografía revisada, se encontró que generalmente, las señales sísmicas contienen componentes de frecuencias de 1 a 10 Hz, por lo que la frecuencia de muestreo debe ser de 20 Hz como mínimo (Tintaya, 2007), por tanto, para el caso particular de la presente investigación se generaron señales sintéticas con un frecuencia relativamente baja que permitieron un trabajo fluido en el software utilizado.

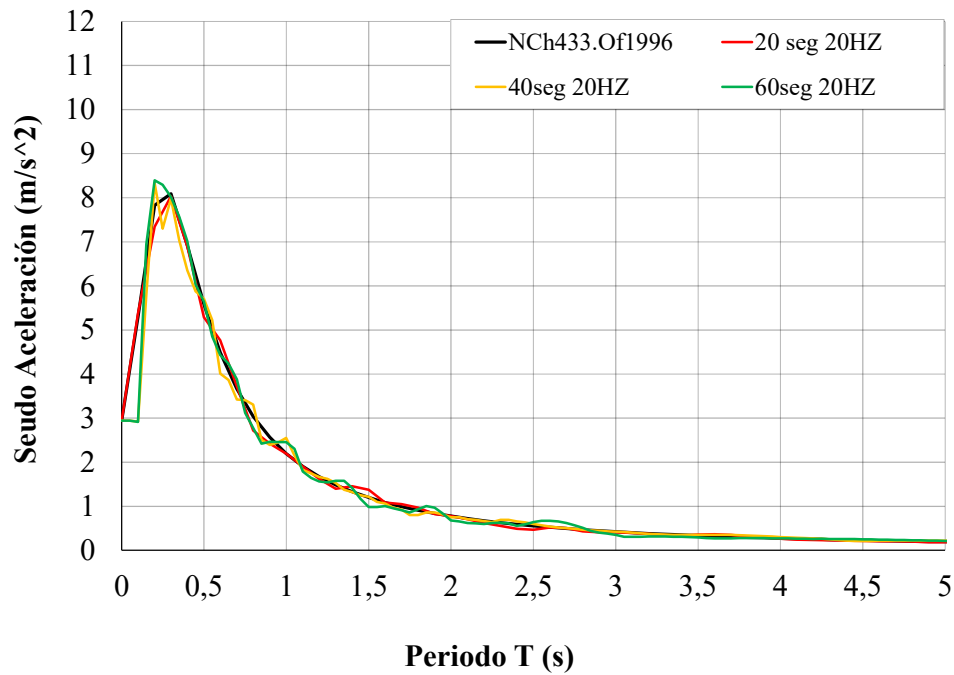


Figura 3-9. Revisión de ajustes de los espectros de diseño para las señales sintéticas de 20 s, 40 s y 60 s.

### 3.5. Casos de análisis.

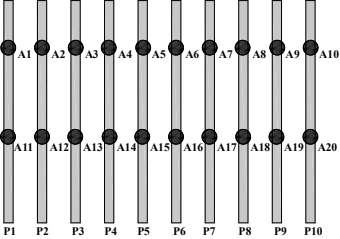
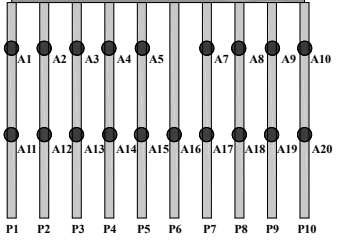
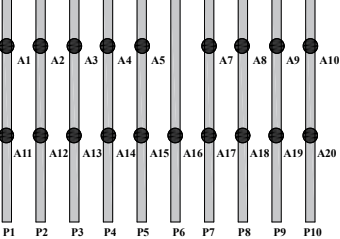
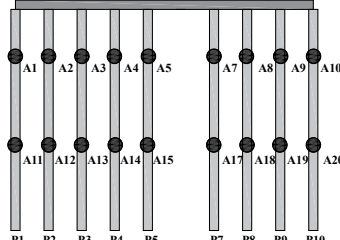
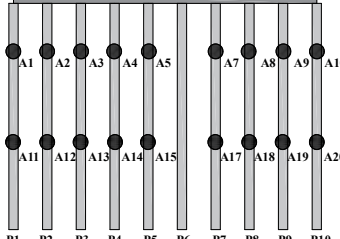
Con la presente investigación se pretende analizar la afectación del sistema de contención de manera general ante la falla de algunos elementos que componen el sistema. Para el sistema en condiciones estáticas, se establecieron los casos de análisis de la Tabla 3-7, con los cuales se desea evaluar las deformaciones máximas en los pilotes y las fuerzas axiales en los anclajes durante la excavación 3 que se realiza a los 21.2 m de profundidad (Etapa 8).

El caso 1 “C1” corresponde al modelo sin falla de elementos, pero sin la presencia de viga cabezal. En el caso 2 “C2” y el caso 3 “C3” se falló el anclaje “A6” que pertenece a la primera fila de anclajes y se encuentra en una posición central, con la diferencia de que

un caso contaba con viga cabezal y el otro caso no, respectivamente. En el caso 4 “C4” se falla el pilote “P6”. En el caso 5 “C5”, se fallan los anclajes “A6” y “A16”, este último anclaje pertenece a la fila inferior y se ubica sobre el pilote 6, de igual forma tiene una ubicación central. En el caso 6 “C6” y el caso 7 “C7”, se propone la falla de los anclajes “A4”, “A5” y “A6” que pertenecen a la fila superior, nuevamente la diferencia entre un caso y el otro se basa en la presencia de una viga cabezal.

Para el sistema en condiciones dinámicas, se establecieron los casos de análisis de la Tabla 3-8, con los cuales se desea evaluar las fuerzas axiales y los desplazamientos relativos en los anclajes, nuevamente durante la excavación 3 que se realiza a los 21.2 m de profundidad (Etapa 8). El caso 1 “C1”, caso 2 “C2” y el caso 3 “C3” es sometido a las señales sintéticas con duraciones de 20 segundos, 40 segundos y 60 segundos (20 s, 40 s y 60 s), respectivamente, las cuales fueron generadas según lo descrito en el numeral 3.4.1. En estos tres primeros casos, se falla el anclaje “A3” ubicado en el centro de la fila superior de anclajes. El caso 4 “C4”, caso 5 “C5” y el caso 6 “C6” es sometido a las señales sintéticas con duraciones de 20 segundos, 40 segundos y 60 segundos (20 s, 40 s y 60 s), respectivamente, y se fallan los anclajes “A3” y “A8”. Finalmente, el caso 7 “C7”, caso 8 “C8” y el caso 9 “C9” es sometido a las señales sintéticas con duraciones de 20 segundos, 40 segundos y 60 segundos (20 s, 40 s y 60 s), respectivamente, y se fallan los anclajes “A3”, “A4” y “A7”.

Es de indicar que inicialmente, el modelo con viga cabezal, que corresponde al modelo base en la presente investigación, fue evaluado tanto en condiciones estáticas como en condiciones dinámicas sin la falla de elementos. Los resultados de estos modelos se presentan en el siguiente capítulo, y son denominados “Modelos base” para la comparación con cada uno de los casos de la Tabla 3-7 y la Tabla 3-8.

Descripción gráfica	Casos de análisis	Elemento a fallar	Descripción
	C1	Sin falla de elementos	El sistema en condiciones estáticas es evaluado sin viga cabezal.
	C2	Anclaje "A6"	Ante la falla del anclaje "A6" el sistema en condiciones estáticas es evaluado con viga cabezal.
	C3	Anclaje "A6"	Ante la falla del anclaje "A6" el sistema en condiciones estáticas es evaluado sin viga cabezal.
	C4	Pilote "P6"	Ante la falla del pilote "P6" el sistema en condiciones estáticas es evaluado con viga cabezal.
	C5	Anclaje "A6" y "A16"	Ante la falla del anclaje "A6" y "A16" el sistema en condiciones estáticas es evaluado con viga cabezal.

	<p>C6</p>	<p>Anclaje "A4", "A5" y "A6"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A4", "A5" y "A6" el sistema en condiciones estáticas es evaluado con viga cabezal.</p>
	<p>C7</p>	<p>Anclaje "A4", "A5" y "A6"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A4", "A5" y "A6" el sistema en condiciones estáticas es evaluado sin viga cabezal.</p>

Tabla 3-7. Casos de análisis modelo en condiciones estáticas.

Descripción gráfica	Caso de análisis	Elemento a fallar	Descripción
	<p>C1</p>	<p>Anclaje "A3"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 20 segundos.</p>
	<p>C2</p>	<p>Anclaje "A3"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 40 segundos.</p>

	<p>C3</p>	<p>Anclaje "A3"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 60 segundos.</p>
	<p>C4</p>	<p>Anclaje "A3" y "A8"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3" y "A8" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 20 segundos.</p>
	<p>C5</p>	<p>Anclaje "A3" y "A8"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3" y "A8" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 40 segundos.</p>
	<p>C6</p>	<p>Anclaje "A3" y "A8"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3" y "A8" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 60 segundos.</p>
	<p>C7</p>	<p>Anclaje "A3", "A4" y "A7"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3", "A4" y "A7" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 20 segundos.</p>

	<p>C8</p>	<p>Anclaje "A3", "A4" y "A7"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3", "A4" y "A7" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 40 segundos.</p>
	<p>C9</p>	<p>Anclaje "A3", "A4" y "A7"</p>	<p>Ante la falla del anclaje "A3", "A4" y "A7" el sistema en condiciones dinámicas es evaluado con viga cabezal sometido a una señal sintética de 60 segundos.</p>

**Tabla 3-8.** Casos de análisis modelo en condiciones dinámicas.



# Capítulo 4

## 4. Análisis de resultados

En el presente capítulo, se da a conocer el análisis de los resultados de las modelaciones numéricas de los diferentes casos de análisis establecidos en la Tabla 3-7. Se realizó una descripción del comportamiento de algunos elementos del sistema una vez se presenta la falla del elemento y se compararon los resultados con investigaciones similares encontradas en la bibliografía revisada.

Inicialmente se presentan los datos de los “Modelos Base” de la siguiente manera: En la Figura 4-1, se encuentran los resultados de deformaciones máximas en los pilotes y fuerzas axiales en la punta de los anclajes según el análisis del modelo numérico en condiciones estáticas con el que se comparará los resultados de los casos “C1”, “C2”, “C3”, “C4”, “C5”, “C6” y “C7”. En la Figura 4-2, se muestran los resultados de fuerzas axiales y desplazamientos relativos en los anclajes del modelo numérico en condiciones dinámicas con el que se comparará los resultados de los casos “C1”, “C2”, “C3”, “C4”, “C5”, “C6”, “C7”, “C8” y “C9”. Para este último modelo, fue posible obtener resultados de desplazamientos a través del tiempo. Los resultados son reunidos en las gráficas de tiempo vs historia (ver anexo A).

Ya con los resultados de las Figuras 4-1 y 4-2, se procede a revisar el comportamiento de los elementos del sistema con relación al incremento de las deformaciones y/o fuerzas axiales y/o desplazamientos relativos, y bajo la incidencia del sistema con y sin viga cabezal y la duración de las señales sintéticas.



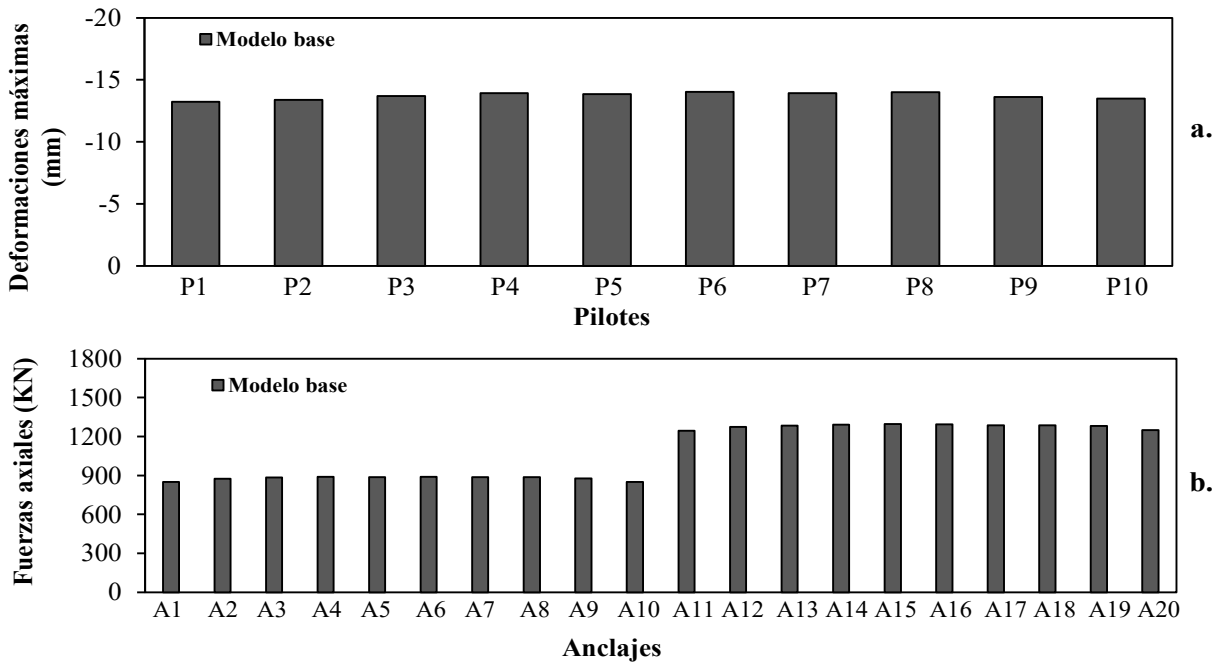


Figura 4-1. Resultados del modelo base en condiciones estáticas a) deformaciones máximas en los pilotes y b) Fuerzas axiales en los anclajes.

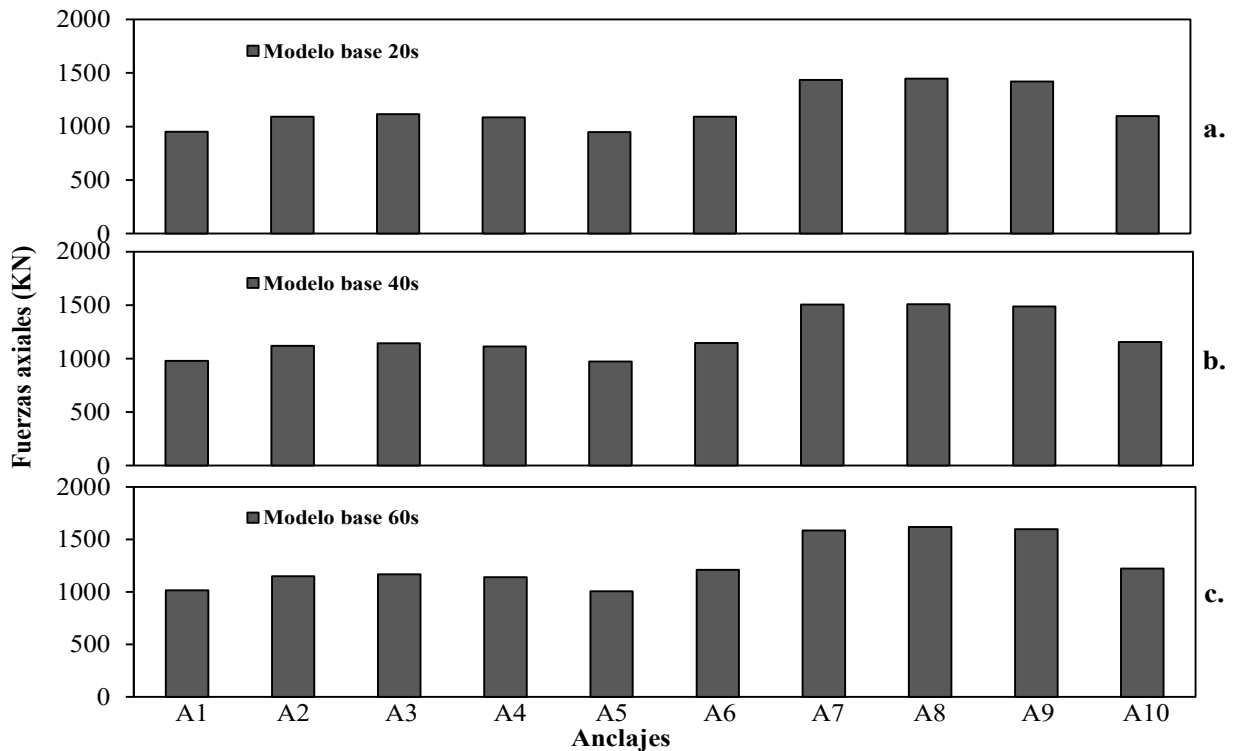
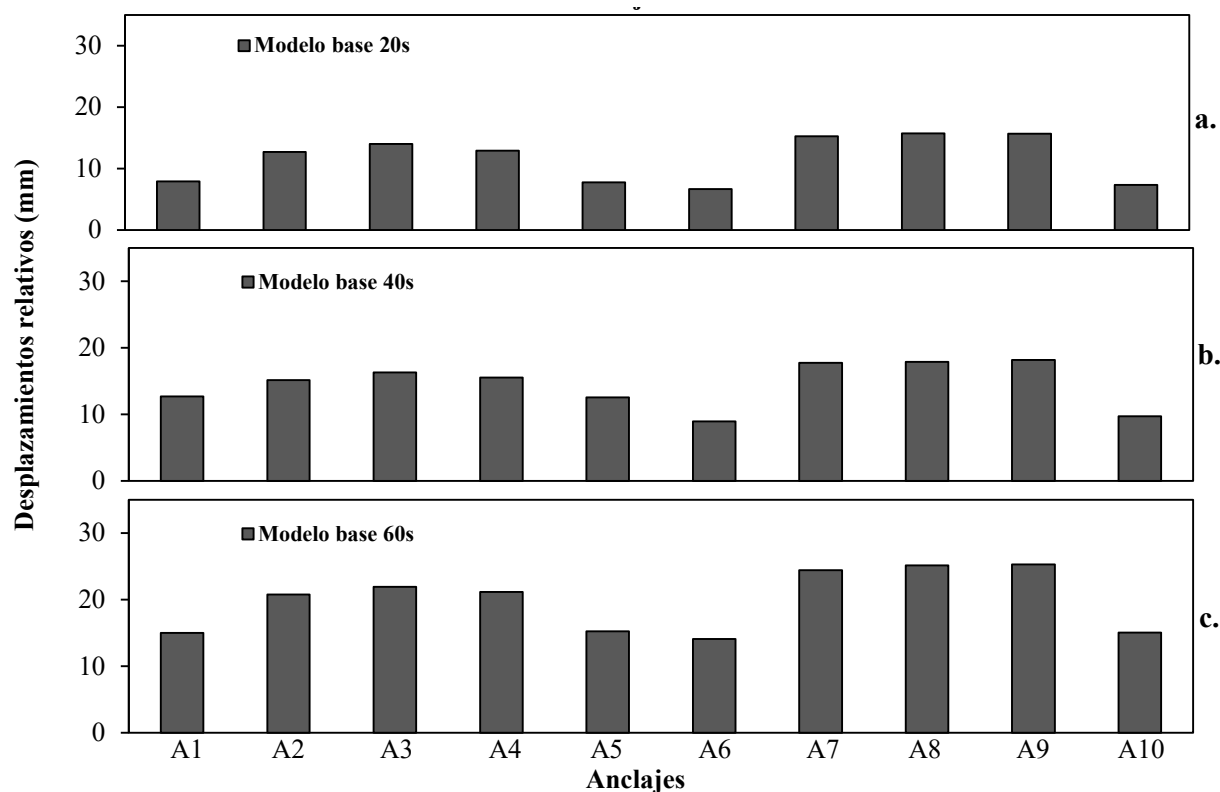


Figura 4-2. Resultados de fuerzas axiales del modelo base ante condiciones dinámicas a) Acelerograma de 20 segundos, b) Acelerograma de 40 segundos y c) Acelerograma de 60 segundos.



**Figura 4-3.** Resultados de Desplazamientos relativos en los anclajes en el modelo base en condiciones dinámicas a) Acelerograma de 20 segundos, b) Acelerograma de 40 segundos y c) Acelerograma de 60 segundos.

## 4.1 Condiciones estáticas

Para los siete casos de análisis de la Tabla 3-7 se compararon los resultados de deformaciones máximas en los pilotes y de fuerzas axiales en los anclajes. Se realizó una comparación de resultados de los casos en el sistema (barras azules o rojas), frente a los datos del sistema del “Modelo base” para condiciones estáticas (barras grises); los incrementos porcentuales corresponden a los marcadores sobre cada una de las barras (marcadores fucsias).

### 4.1.1 Comportamiento de las deformaciones

En la Figura 4-4 se presentan los resultados de las deformaciones máximas en los pilotes y para cada uno de los casos establecidos en la Tabla 3-7. Los resultados obtenidos son comparados con los valores del modelo base de la Figura 4-1 a) y se calculan valores porcentuales de incremento para mejor comprensión de los mismos.

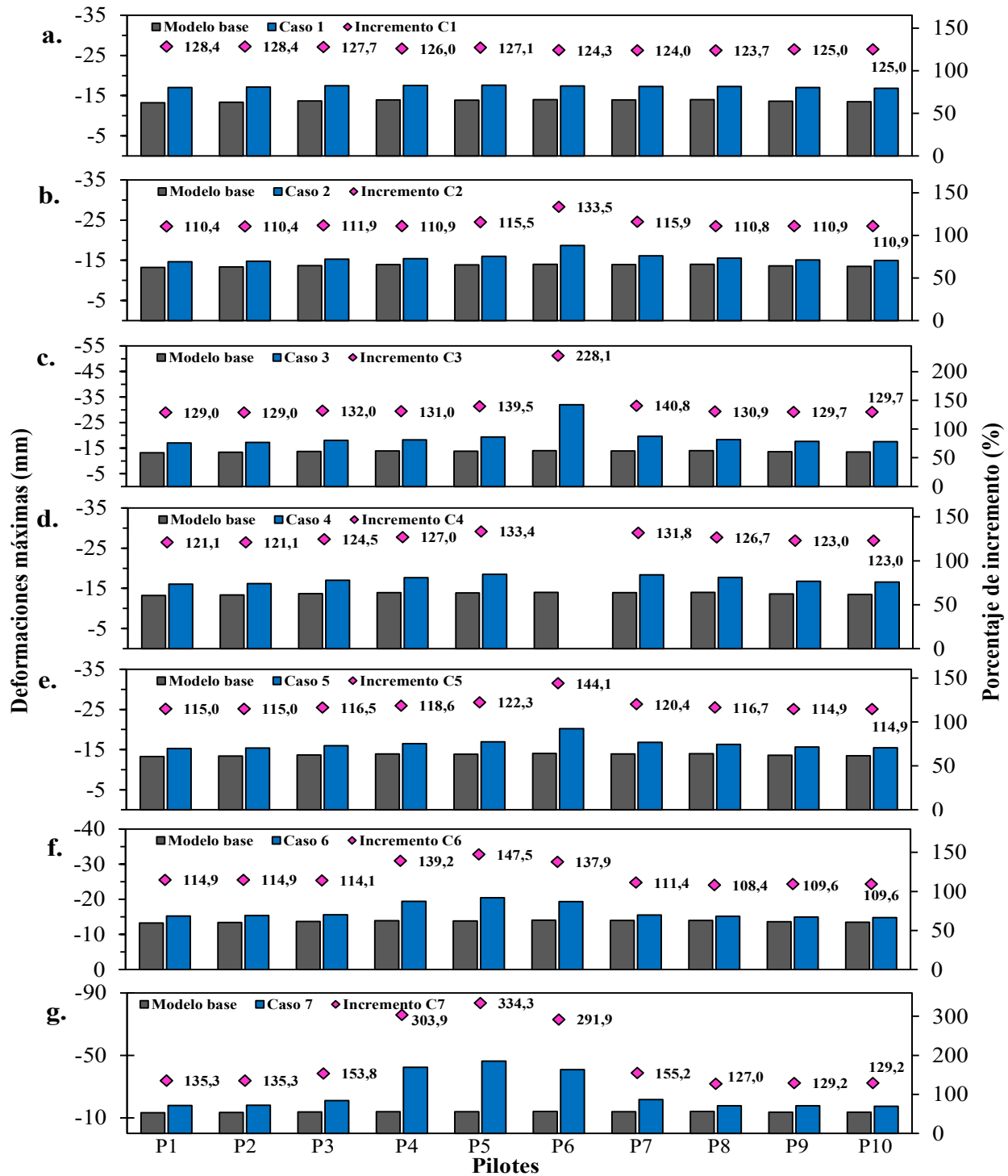


Figura 4-4. Deformaciones máximas para condiciones Estáticas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6” y d) caso de análisis “C7”.

Se observa que para el caso 1, las deformaciones tienen un comportamiento esperado, toda vez, que se genera un incremento significativo de las deformaciones máximas en los pilotes al no presentarse una viga cabezal. Los incrementos en este caso se encuentran entre el 123,7% y el 128,4%.

Para el caso 2 y el caso 3, se puede plantear una comparativa entre los casos, ya que se falla el anclaje “A6”, pero el caso 2 corresponde al sistema con viga cabezal y el caso 3 corresponde al sistema sin viga cabezal. Para el caso 2, las deformaciones aumentan el 133,5% sobre el pilote “P6”, sin embargo, las deformaciones en los demás pilotes se encuentran entre el 110,4% y el 115,9%, son aumentos muy pequeños porcentualmente. Por otro lado, en el caso 3, las deformaciones sobre el pilote “P6” aumentan considerablemente, en un 94.6%, respecto al caso 2, mientras que respecto al modelo base, aumenta en un 228.1%, aunque diferente del caso 2, las deformaciones en los demás pilotes no disminuye, sino que aumenta entre un 129.0% y un 140.8%, es decir entre 10 y 20 puntos porcentuales más que el caso 2, sin embargo, en ambos pilotes adyacentes al pilote “P6”, se distribuyen las deformaciones al aumentar un poco la tasa de variación respecto a los demás pilotes.

Para el caso 4, se falla el pilote “P6” considerando la viga cabezal dentro del sistema, se observa que los pilotes “P5” y “P4”, y los pilotes “P7” y “P8”, registran incrementos en las deformaciones, mayores a las registradas en los demás pilotes aproximadamente en 10 puntos porcentuales.

Para el caso 5, al fallar el anclaje “A6” y “A16” se registra una deformación máxima de 20.21 mm en el pilote “P6”, es decir, un incremento del 144,1% respecto a la deformación del pilote “P6” del modelo base, no es significativo como en otros casos. Además, en los pilotes adyacentes no hay incrementos en las deformaciones mayores al 122%.

Para el caso 6 y el caso 7, se puede plantear otra comparativa entre casos, debido a que se falla el anclaje “A4”, “A5” y “A6”, pero en el caso 6 se emplea el sistema con viga canal, mientras que en el caso 7 se emplea el sistema sin viga cabezal. Para el caso 6, las deformaciones ganan un incremento en los pilotes “P4”, “P5” y “P6”, siendo el pilote “P5”, con las mayores deformaciones respecto al modelo base con 147.5%; mientras que las deformaciones en los pilotes donde no falla ningún anclaje presentan deformaciones muy similares al comportamiento del modelo base. Para el caso 7, es donde se presentan

las mayores deformaciones para la mayoría de los pilotes, sobre todo en los pilotes donde se fallaron los anclajes “A4”, “A5” y “A6”, donde se presentan deformaciones de entre 291.9% y 334.3%, mientras que en los pilotes donde se conservan las dos líneas de anclajes, se presentan variaciones entre 127.0% y 155.2%.

Se puede determinar que, en los sistemas que tenían viga cabezal, las deformaciones de los pilotes no variaban significativamente, caso contrario para para los sistemas que no tenían viga cabezal. Este comportamiento también se presentó en un estudio del mecanismo de colapso progresivo de excavaciones retenidas por pilotes contiguos en voladizo, donde, debido a la coordinación proporcionada por la viga cabezal, los desplazamientos de los pilotes no variaron significativamente en los casos donde se empleó viga cabezal (Cheng et al., 2017).

#### 4.1.2 Comportamiento de las fuerzas axiales

En la Figura 4-5 que representa los resultados de manera general de los casos, se observa que tanto para los sistemas con viga cabezal como los sistemas sin viga cabezal la primera línea de anclajes, desde “A1” hasta “A10”, presenta fuerzas por encima los 850 KN, en cambio, la segunda línea de anclajes registra fuerzas axiales a partir de los 1250 KN. Un comportamiento que permite deducir que en el sistema existe una mayor concentración de esfuerzos en la segunda línea de anclajes.

Para el caso 1, el aumento de la fuerza axial varía entre el 100.4% y el 103.8%, denotando que no hay una gran incidencia de los resultados, entre el modelo base y el sistema sin viga cabezal. Para el caso 2 (Figura 4-5 b.) y el caso 3 (Figura 4-5 c.), en donde se falla el anclaje “A6”, se obtienen incrementos entre el 100.1% y el 105%, son incrementos pequeños y no hay gran incidencia por parte de la viga cabezal. Aun así, es posible notar que los anclajes “A5” y “A7” presentan los mayores incrementos en la fila superior de anclajes y los anclajes más alejados de la zona de falla presentan incrementos despreciables. Para el caso 4, donde se falla el pilote “P6”, empleando el sistema con viga cabezal, se presenta que en la fila superior los anclajes “P5” y “P4”, y en la fila inferior los anclajes “P7” y “P8”, presentan los mayores incrementos en las fuerzas, entre el 103,8% y 103,4%.

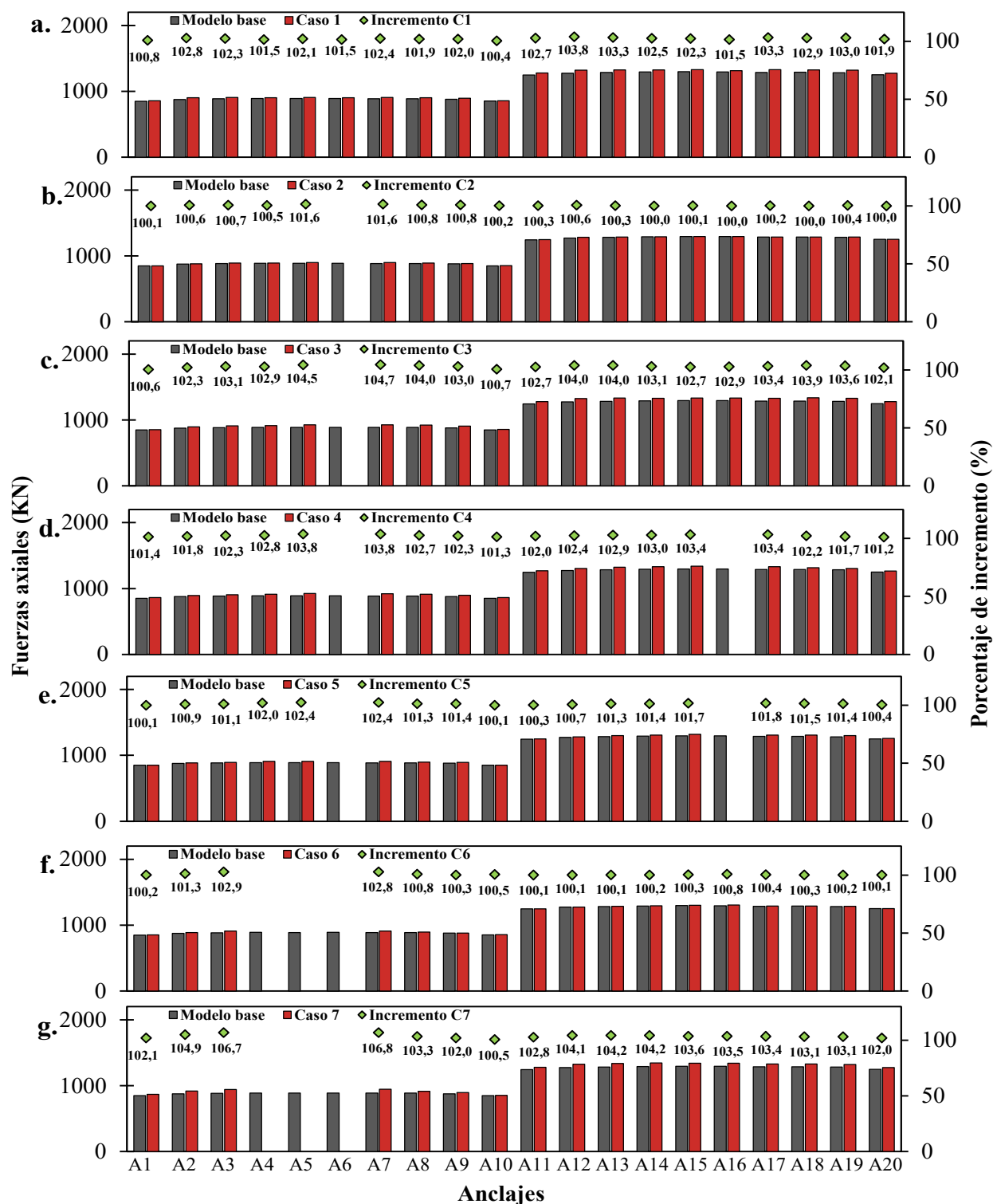


Figura 4-5. Fuerzas axiales para condiciones estáticas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6” y d) caso de análisis “C7”.

Con el caso 5, ocurre que se presenta un comportamiento similar al del caso 4, pues ambos son sistemas que no cuentan con los anclajes “A6” y “A16”, sin embargo, se logra apreciar, que en el caso 5, donde si hay presencia de pilote, en los anclajes “P5” y “P4” de la fila superior y los anclajes “P7” y “P8” de la fila inferior, el aumento porcentual de las fuerzas axiales se encuentra 2 puntos por debajo del que se presenta en el caso 4. Esto permite asumir, que la presencia del pilote mitiga un poco el sobreesfuerzo que deben hacer los anclajes adyacentes a la zona de falla.

Para el caso 6 y el caso 7, es posible realizar una comparación, pues los elementos de fallas son el anclaje “A4”, “A5” y “A6”, pero en el caso 6 se emplea el sistema con viga canal, mientras que en el caso 7 se emplea el sistema sin viga cabezal. Ya es posible observar, una diferencia de 4 puntos porcentuales en cuanto a los incrementos entre ambos sistemas. Esperando un comportamiento normal y a pesar de que los incrementos no superan el 110%, en el sistema sin viga cabezal se presentan los aumentos en las fuerzas axiales en mayor magnitud.

Es posible determinar que, al momento de la falla de uno de los anclajes, ya sea de la primera o segunda fila, los demás anclajes presentaran un incremento de carga, siendo mayor en los anclajes cercanos al de la falla y menor en los más lejanos. Esta situación presenta similitud con los resultados obtenidos en el artículo “Un estudio numérico sobre la influencia de la falla de anclaje para una excavación profunda retenida por muros de pilotes anclados.”, en donde, el incremento máximo de pretensado se produce en los anclajes adyacentes a la posición de falla, y el incremento de pretensado disminuyó de manera no lineal con el aumento de la distancia desde la posición de falla (Zhao et al., 2018).

Este comportamiento alimenta la necesidad del estudio de los sistemas de contención usados en excavaciones profundas ante la posibilidad de fallas en sus elementos, pues, el colapso parcial conlleva al colapso progresivo del sistema, situación que puede interpretarse sucedió con dos casos alternos establecidos durante el proceso de modelación de MIDAS GTS NX, donde al no presentarse viga cabezal y fallar un anclaje superior y un anclaje inferior, y además, el colapso del pilote relacionado con dichos anclajes, conllevó a la inestabilidad del sistema, pues el modelo no pudo completar la etapa 6, que corresponde a la segunda excavación.

## 4.2 Condiciones dinámicas

Para los nueve casos de análisis de la Tabla 3-8 se compararon los resultados de las fuerzas axiales y los desplazamientos relativos en los anclajes. Se realizó una comparación de resultados de los casos en el sistema (barras naranjas o verdes), frente a los datos del sistema del “Modelo base” para condiciones dinámicas (barras grises); los incrementos porcentuales corresponden a los marcadores sobre cada una de las barras (marcadores fucsias).

### 4.2.1 Comportamiento de las fuerzas axiales

En la Figura 4-6 se presentan los resultados de las fuerzas axiales en los anclajes para cada uno de los casos establecidos en la Tabla 3-8. Es posible apreciar de manera general una mayor concentración de esfuerzos en la fila inferior de anclajes, un comportamiento esperado. En el caso 1, caso 2 y caso 3, estableciendo una comparación debido a que se presenta la misma falla del anclaje “A3”, se aprecia que el aumento de la duración de la señal sintética no es de gran incidencia, pues los incrementos entre el sistema sometido a 20 segundos y el sistema sometido a 60 segundos varían en promedio entre el 105% y 107%. En los casos 4, 5 y 6 (Figura 4-6 d., e. y f.) se observa un aumento significativo de las fuerzas axiales. En el caso 5, donde se somete a una señal de 40 segundos, se genera un incremento del 118,6% en el anclaje “A7” y del 123,8% en el anclaje “A9”, los cuales son adyacentes a las zonas de falla.

En los casos 7, 8 y 9 los incrementos son mayores, debido a que se comprometen dos anclajes de la fila superior y un anclaje de la fila inferior. Se observa que en la fila superior el anclaje “A2” presenta incrementos de 136% para “C7”, 138% para “C8” y 138,8 para “C9”.

Es posible estimar, que, en cuanto a fuerzas axiales, la duración del sismo no tiene gran incidencia hasta cierto punto, pues en el caso particular, se notó un incremento significativo entre los sistemas sometidos a 20 segundos y los sistemas sometidos a 40 segundos, sin embargo, el incremento disminuía al someterse a una señal de 60 segundos. Se aprecia gran incidencia de la viga cabezal, pues los incrementos de fuerzas axiales no sobrepasaron el 140% de manera general. Finalmente, se logra apreciar un comportamiento similar al establecido en condiciones estáticas, pues los anclajes adyacentes a las zonas de fallas son quienes mayores incrementos porcentuales arrojan.



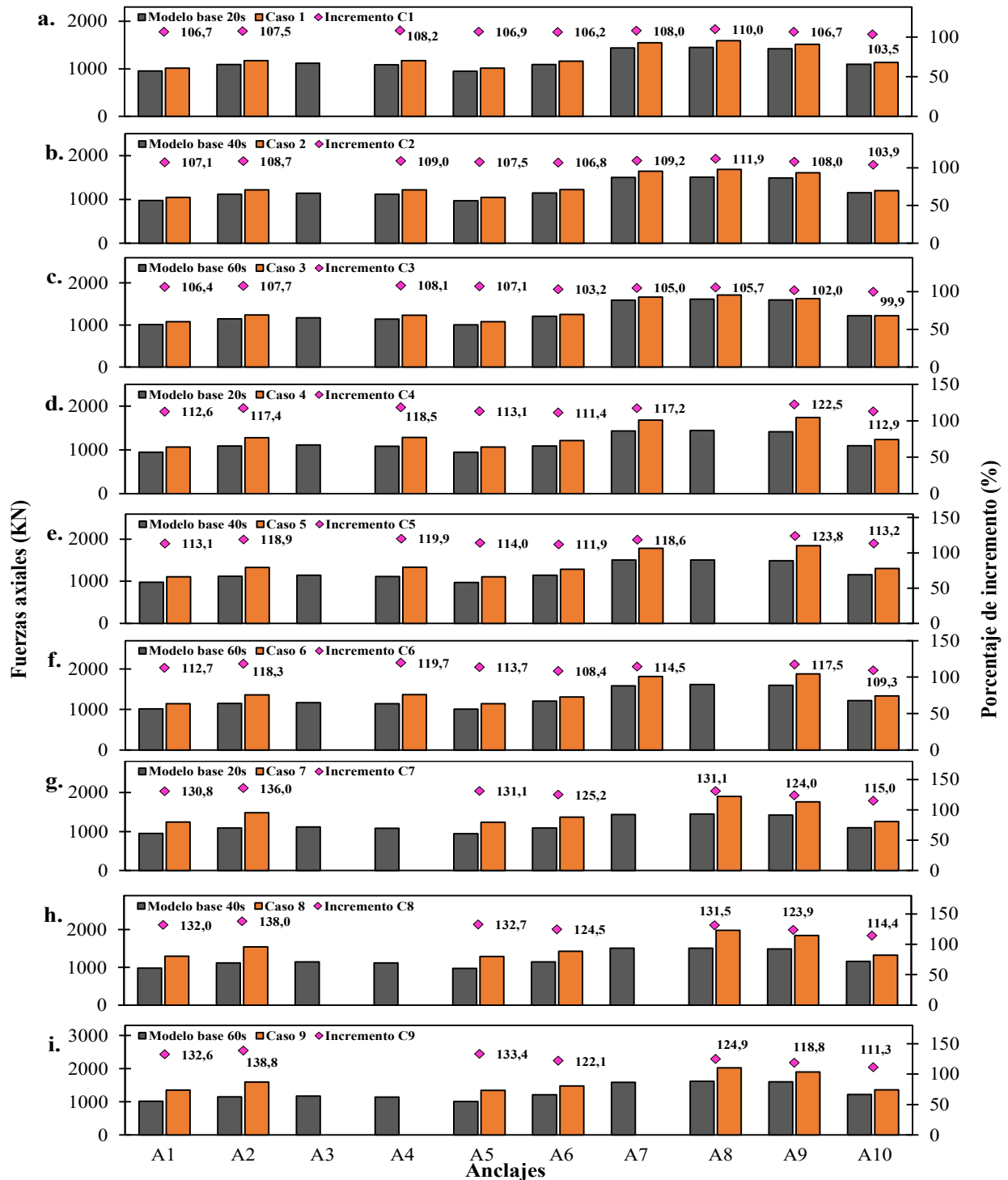


Figura 4-6. Fuerzas axiales para condiciones dinámicas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6”, g) caso de análisis “C7”, h) caso de análisis “C8” y i) caso de análisis “C9”.

### 4.2.2 Comportamiento de los desplazamientos relativos

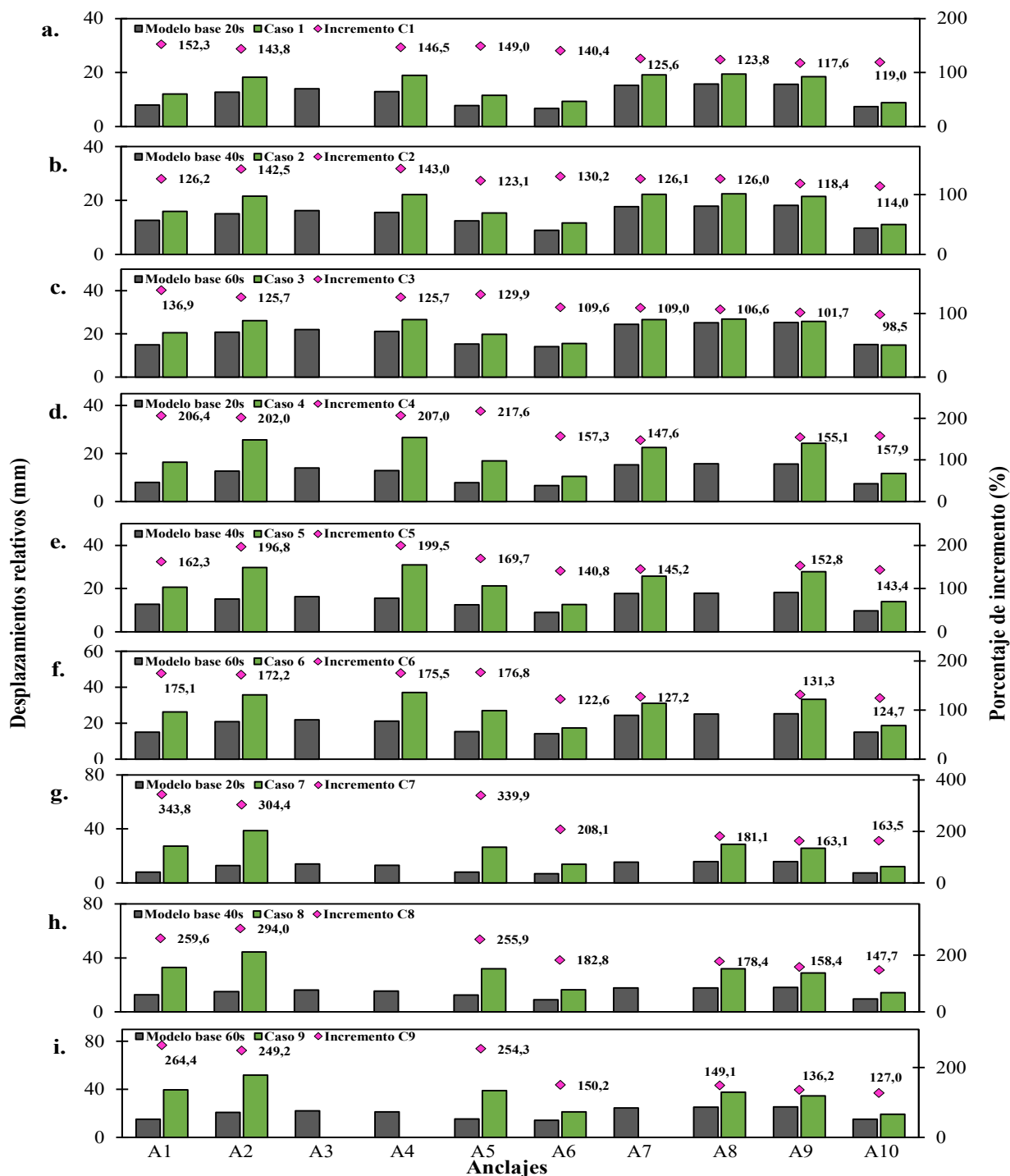


Figura 4-7. Desplazamientos relativos para condiciones dinámicas a) caso de análisis “C1”, b) caso de análisis “C2”, c) caso de análisis “C3”, d) caso de análisis “C4”, e) caso de análisis “C5”, f) caso de análisis “C6”, g) caso de análisis “C7”, h) caso de análisis “C8” y i) caso de análisis “C9”.

En la Figura 4-7 se presentan los resultados de desplazamientos relativos en los anclajes para cada uno de los casos de la Tabla 3-8. A manera general, en todos los casos los anclajes centrales como “A2”, “A3”, “A4”, “A7”, “A8” y “A9” presentaron mayores desplazamientos relativos, una vez sometidos a los diferentes sismos. Sin embargo, el incremento de esfuerzo con respecto al modelo base, no es directo o lineal, pues en el caso 1, cuando el modelo se sometió a 20 segundos, y se falló el anclaje “A3”, y el anclaje “A7” se desplazó un 125,6%, mientras que el anclaje “A8” se desplazó un 123,8%. Los casos 2 y 3, registran un comportamiento similar, sin embargo, entre los tres casos, la duración del sismo no tiene gran incidencia; para el anclaje “A2”, cercano a la zona de falla, se registra en “C1” un incremento de 143,8%, en “C2” un incremento de 142,5% y en “C3” un incremento de 125,7%.

En el caso 4, 5 y 6, es posible realizar una comparación debido a que se fallan los anclajes “A3” y “A8” para todos los casos. Se registra mayores incrementos de desplazamientos relativos en la fila superior de anclajes, por ejemplo, en el caso 5 (Figura 4-7 e.), los anclajes “A2” y “A4” incrementaron sus desplazamientos en un 196,8% y 199,5%, respectivamente, mientras que los anclajes “A7” y “A9” incrementaron sus desplazamientos en un 145,2% y 152,8%, respectivamente.

En los casos “C7”, “C8” y “C9”, se presentan grandes incrementos en la primera línea de anclajes, sin embargo, se puede estimar que se debe en gran medida a la falla de los anclajes y no a la duración del sismo, por ejemplo, el caso 7 (Figura 4-7 g.) sometido a una señal sintética de 20 segundos, presenta incrementos de 343,8% en el anclaje “A1”, 304,4% en el anclaje “A2” y 339,9% en el anclaje “A5”, en cambio, para el mismo sistema sometido a una señal sintética de 60 segundos, caso 9 (Figura 4-7 i.), los incrementos en los anclajes “A1”, “A2” y “A5”, son de 264,4%, 249,2% y 254,3%, respectivamente.

Se puede evidenciar que la duración del sismo tiene una baja incidencia en la estabilidad del sistema, toda vez que, para las tres duraciones se obtuvo un comportamiento similar de desplazamientos relativos. Sin embargo, la falla de los anclajes, en los diferentes casos es significativa, influyendo primordialmente en la fila superior de anclajes. Es posible estimar que a pesar de las deformaciones registradas, el sistema presenta buen comportamiento ante la falla de elementos durante un sismo, situación que se atribuye a la incidencia de la viga cabezal que permita controlar las deformaciones en los elementos del sistema de contención.

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

En la presente investigación fue posible realizar una evaluación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por pilotes anclados en condición estática y dinámica ante diferentes tipos de fallas parciales a partir de un modelo numérico calibrado con el software MIDAS GTS NX. Con el análisis de los resultados obtenidos, se llegan a las conclusiones acá plasmadas. De igual forma, se establecen las limitaciones presentadas y las recomendaciones para futuras investigaciones.

### 5.1. Conclusiones.

- Con la presente investigación fue posible observar el comportamiento de las deformaciones de los pilotes en condiciones estáticas, determinando que la implementación de la viga cabezal incide de forma positiva en la distribución y control de las deformaciones de los pilotes, pues teniendo en cuenta que aun cuando el sistema fue sometido a falla de anclajes y pilotes, los incrementos en las deformaciones en los pilotes no fueron significativos en comparación con los resultados de los sistemas que no contaban con viga cabezal. Este comportamiento se observó de forma clara en el caso “C7”, donde el sistema no contaba con viga cabezal y por ende, se llegó a alcanzar un incremento de 334,3% en el pilote “P5”, mientras que en el caso “C6”, donde se fallaron anclajes en las mismas posiciones, el incremento para el pilote “P5” fue de apenas el 147,5%, ya que este sistema contaba con viga cabezal.

- Con relación a las fuerzas axiales de los anclajes en condiciones estáticas, se evidenciaron incrementos que no superaron el 107% como en el caso “C7” donde se fallaron los anclajes “A4”, “A5” y “A6”, aun así, fue posible determinar que, el colapso parcial de los anclajes tiene un efecto de carga sobre los demás elementos adyacentes debido a que, aun cuando el sistema cuenta con viga cabezal, se registró un incremento de carga significativa en los anclajes cercanos a la zona de falla, caso contrario para los anclajes en las zonas más alejadas de la falla.
- Respecto a las fuerzas axiales y desplazamientos relativos de los anclajes en condiciones dinámicas, se contemplaron sismos de diferente duración con el fin de evaluar la incidencia del tiempo. Se logró determinar que la duración del sismo no tiene mayor incidencia, debido a que los incrementos de carga solo fueron significativos en los sistemas sometidos a sismos de 20 segundos, luego, para los sistemas de 40 y 60 segundos, los incrementos fueron menores o se mantenían en valores similares, y la afectación al sistema correspondió a la falla de los elementos según los diferentes casos establecidos. En los casos “C7”, “C8” y “C9”, el anclaje “A2” registró incrementos en las fuerzas axiales de 136%, 138% y 138,8%, respectivamente, demostrando la baja incidencia de la duración del sismo, pues después del sismo de 20 segundos, los incrementos solo fueron de 2 puntos porcentuales.
- Las señales sintéticas obtenidas se ajustan a las condiciones sísmicas propias de la ubicación del caso de estudio casos de estudio según la norma de diseño sísmico chilena NCh433.Of1996 modificada en 2012, ( $A_0 = 0.3g$ ). Con estas señales fue posible simular el modelo calibrado en condiciones dinámicas obteniendo que, los desplazamientos relativos en los anclajes incrementan con respecto a la variabilidad de las fallas en estos elementos y no es directamente proporcional a la duración de la señal. Pues se encontró que, respecto a los diferentes casos establecidos, lo que más afectó fue la falla de los anclajes “A3”, “A4” y “A7” (casos “C7”, “C8” y “C9”) llegando a incrementar un 339,9% por ciento en el anclaje “A5” (caso “C7”). Es decir, que la incidencia de la falla parcial de un anclaje es más significativa que la duración de un sismo, por lo cual, el estudio anticipado del sistema simulando fallas de los elementos, puede generar aportes al diseño sísmico de manera favorable.

## 5.2. Limitaciones y recomendaciones.

- Se recomienda trabajar con unas tensiones de cargas mayores a las establecidas en la presente investigación con el fin de monitorear el comportamiento de las fuerzas axiales no solo en la etapa 8, sino también en la etapa 4 y 6 correspondientes a la excavación a los 5 m y 13.5 m de profundidad, respetivamente. De igual forma, se observa poca incidencia de los anclajes ante el control de las deformaciones de los pilotes en condición estática, pues cuando el sistema cuenta con viga cabezal, las deformaciones se incrementan muy poco ante la falla de anclajes.
- Es de resaltar que la presente investigación fue realizada para un caso de estudio particular que cuenta con condiciones de suelo en las que a los 50 m de profundidad no se presenta nivel freático, razón por la cual no se tuvo en cuenta el efecto del agua sobre las respuestas a la falla de anclajes o pilotes. Se recomienda evaluar la incidencia de la falla parcial en sistemas de contención conformados por pilotes anclados ante condición estática y dinámica en escenarios donde se considere nivel freático.
- Teniendo en cuenta que se indujeron señales sintéticas al modelo de caso de estudio para condiciones dinámicas, debido a la particularidad de la presente investigación, se recomienda la obtención de resultados con el uso de registros sísmicos reales. Pues los resultados aquí obtenidos son resultado de un caso que cuenta con condiciones únicas, por lo que dificulta derivar conclusiones generales.
- Una limitante en la presente investigación es que los resultados obtenidos solo pueden ser extrapolados y considerados para condiciones geológicas similares. Se espera incentivar la investigación de sistemas de contención utilizadas en excavaciones profundas, pues la bibliografía encontrada respecto a proyectos similares Latinoamérica es muy poca, además, conocer el comportamiento estático y sísmico en diferentes casos aportaría recomendaciones de diseño.
- Se recomienda el estudio del sistema cuando presenta fallas en los pilotes para evaluar el comportamiento de las deformaciones laterales durante el sismo y a las profundidades de 13.5 m (etapa 6) y 21.2 (etapa 8).



# A. Anexo: Graficas tiempo vs historia para los casos de análisis del modelo en condiciones dinámicas.

CASO 1, CASO 2 y CASO 3.

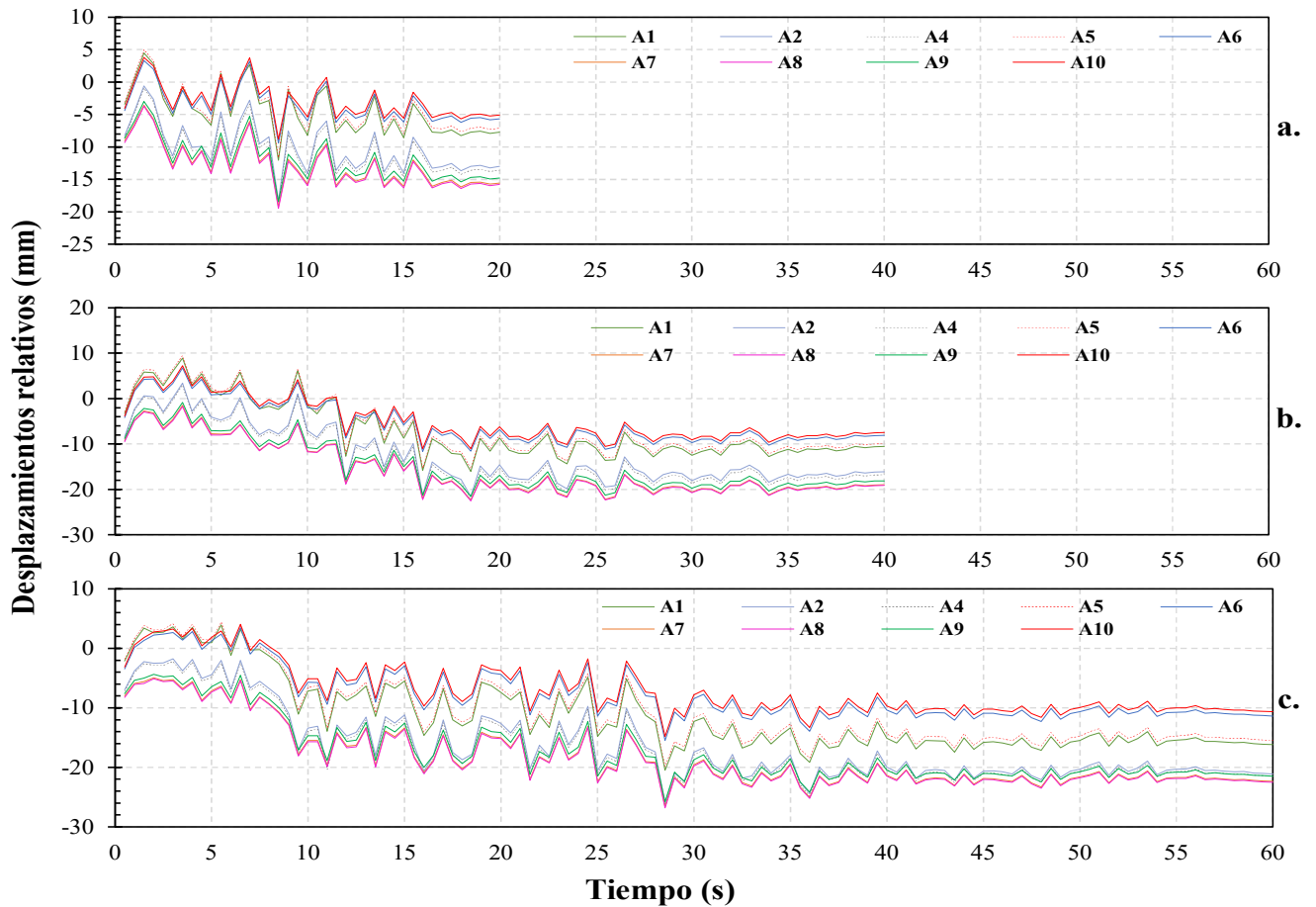


Figura A-5-1. Desplazamientos relativos donde a) caso de análisis "C1", b) caso de análisis "C2" y c) caso de análisis "C3".



CASO 4, CASO 5 y CASO 6.

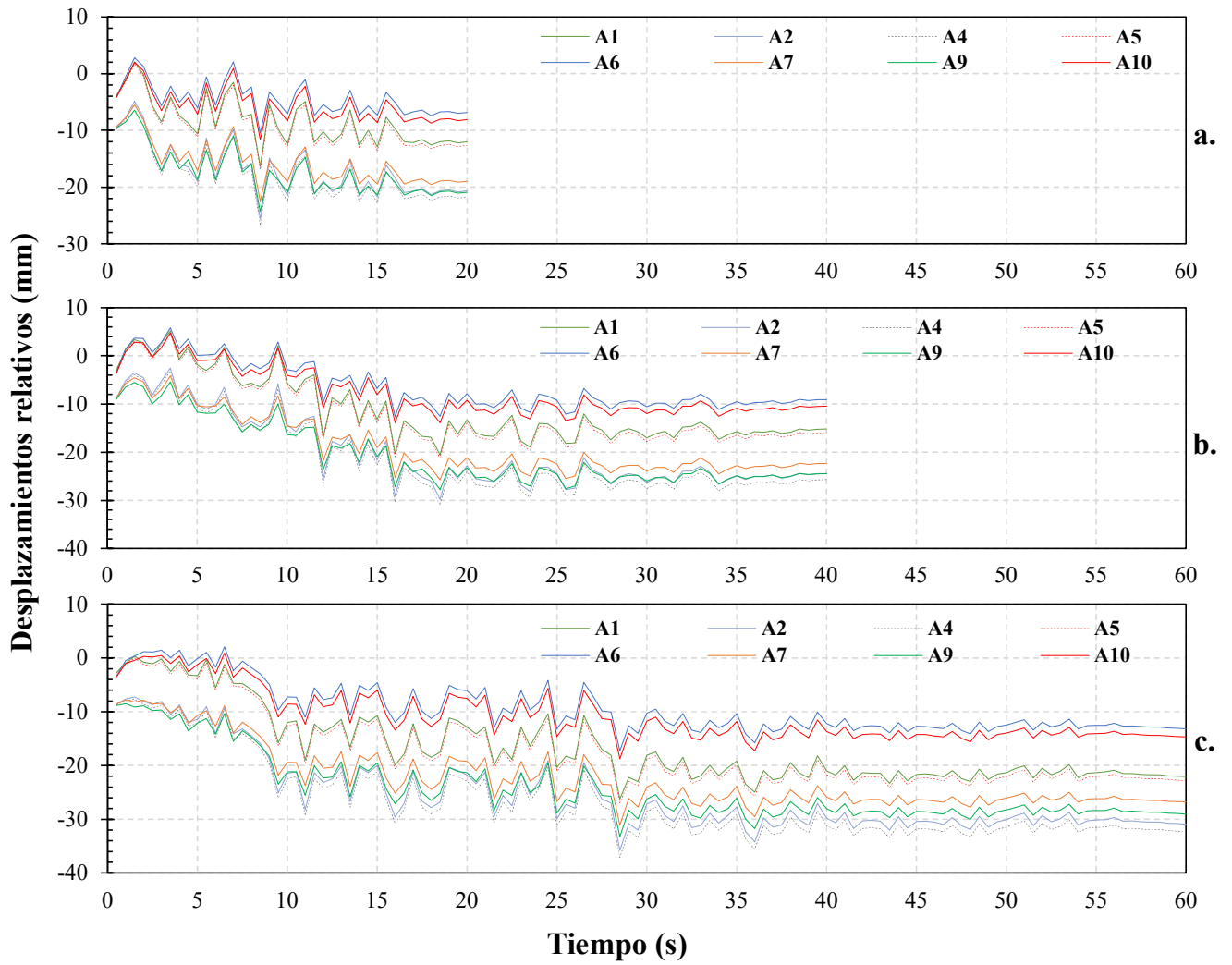


Figura A-5-2. Desplazamientos relativos donde a) caso de análisis “C4”, b) caso de análisis “C5” y c) caso de análisis “C6”.

CASO 7, CASO 8 y CASO 9.

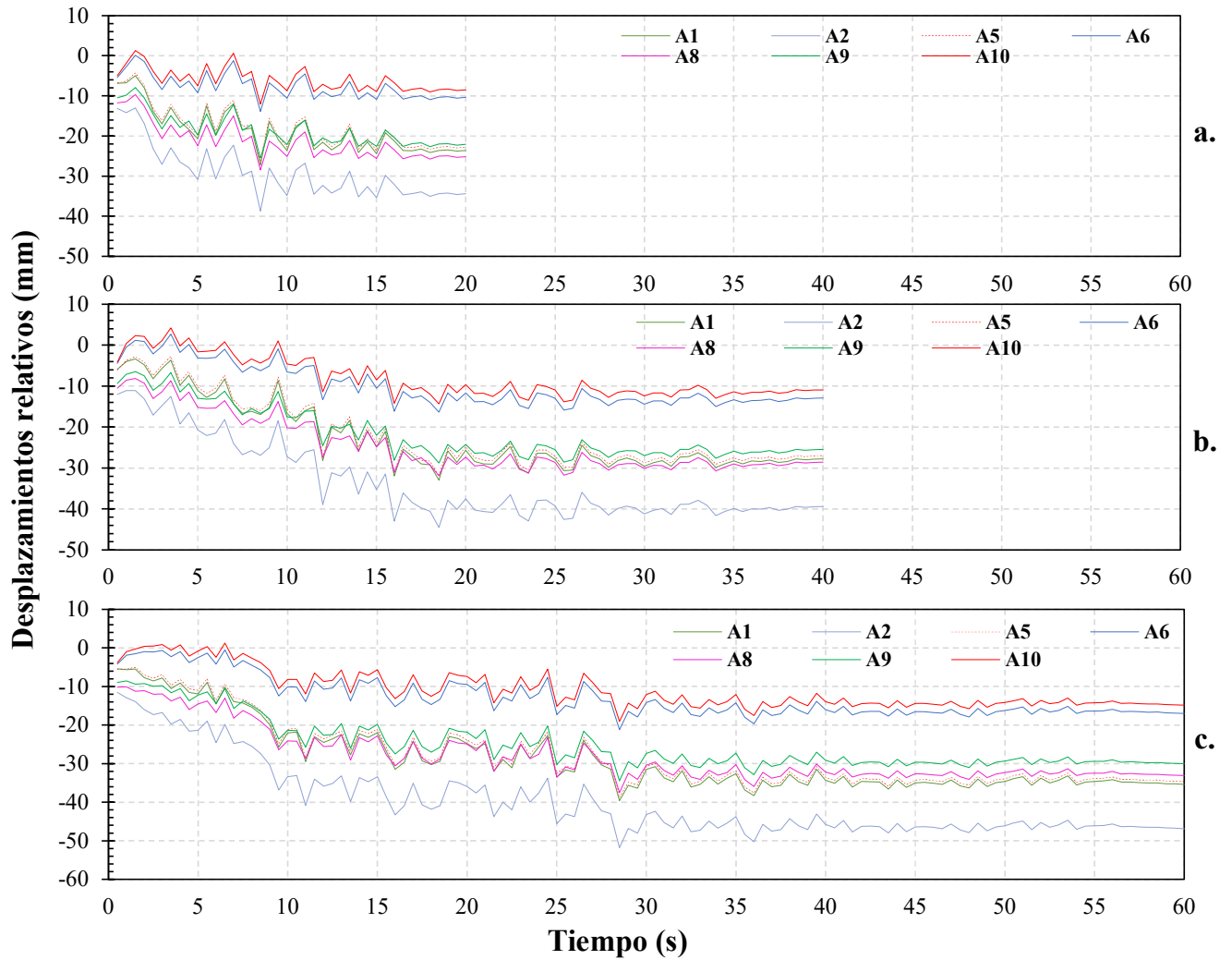


Figura A-5-3. Desplazamientos relativos donde a) caso de análisis “C7”, b) caso de análisis “C8” y c) caso de análisis “C9”.



# Bibliografía

- Agudelo Zapata, J. (2014). *Manual de usuario AcelSin*.
- Arias, J. (1984). *Socalzados de Edificios en la Grava de Santiago* [Tesis de Grado]. Universidad de Chile.
- Cándido, J. (2017). *Cálculo estructural: El Método de los Elementos Finitos*. EADIC. <https://eadic.com/blog/entrada/calculo-estructural-el-metodo-de-los-elementos-finitos/>
- Cheng, X., Zheng, G., Diao, Y., Huang, T., Deng, C., Lei, Y., & Zhou, H. (2017). Study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by Cantilever contiguous piles. *Engineering Failure Analysis*, 71, 72-89. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.06.011>
- Eigenvalue Analysis control*. (2001, 13 diciembre). [http://manual.midasuser.com/EN\\_Common/Civil/895/Start/06\\_Analysis/Eigenvalue\\_Analysis\\_Control.htm](http://manual.midasuser.com/EN_Common/Civil/895/Start/06_Analysis/Eigenvalue_Analysis_Control.htm)
- Flores-López, F. A., & Ayes-Zamudio, J. C. (2018). GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS MEDIANTE EL USO DE WAVELETS, ORIENTADOS a APLICACIONES GEOTÉCNICO-ESTRUCTURALES. *Ingeniería sísmica*. <https://doi.org/10.18867/ris.98.480>
- Frías Valero, E. (2004) *Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. Tesis doctoral. UPC.
- García, D. (2020). *Pautas para la correcta ejecución de un sistema de protección contra la corrosión de la cabeza de un anclaje permanente y activo* diana rocío García Galvis universidad pedagógica y tecnológica de Colombia facultad de ingeniería escuela de

*posgrados Tunja 2*. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.

- Gómez, C. (2016). *SIMULATION OF URBAN EXCAVATIONS BY FINITE MODELS ELEMENTS IN ALLUVIAL SEDIMENTARY DEPOSITS IN SABANETA*. [Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Maestría en Ingeniería modalidad profundización]. Universidad EAFIT.
- Granados, R. V. B., Vargas, C. J. S., & Cárdenas, L. A. C. (2018). Analysis of deflections and settlements in deep excavations on soft soils of Bogotá. *Ingeniería y Desarrollo*. <https://doi.org/10.14482/inde.36.2.10469>
- Herold, A. & Von Wolffersdorf, P. (2009). *The Use of Hardening Soil Model with Small-Strain Stiffness for Serviceability Limit State Analyses of GRE Structures*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208325494>
- Keller. (2019). *Pilotes perforados y muros de pilotes (pilotes “in situ”)*. Soluciones Geotécnicas Para La Construcción.
- Khoiri, M., & Ou, C. (2013). Evaluation of deformation parameter for deep excavation in sand through case histories. *Computers and Geotechnics*, 47, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.06.009>
- Lacera, G. (2015). *Modelamiento de muros anclados para la estabilización de excavaciones en la construcción del proyecto ISWARÁ del sector comercial del municipio de Barrancabermeja, Santander*. [Trabajo de grado para optar por el título de especialista en geotecnia ambiental]. Universidad de Santander.
- Li, X., Pan, Y., Zhan, L., Chen, J. (2023) Dynamic and explainable deep learning-based risk prediction on adjacent building induced by deep excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140, 105243. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105243>
- Malekia, J., Pak, A., Yousefi, M., & Aghakhani, N. (2022). A Comprehensive FE study for design of anchored wall systems for deep excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 122, 104340. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104340>

- MIDAS GTS NX - Software análisis geotécnicos 2D y 3D. (s. f.).*  
<https://www.midasoft.com/es/latinoamerica/productos/ingenieriageotecnica/midasgtsnx>
- Monroy, R. S. (2007). *Anclaje en suelos*. [Maestro en Ingeniería]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- NCh433 (2012). *Diseño sísmico de edificios*. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile.
- Pineda-Contreras A.R., Auvinet-Guichard G. (2013). Método del elemento finito estocástico en geotecnia. Enfoque espectral. *Ingeniería Investigación y Tecnología XIV*. 11-22. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.
- Piedra, R. (2018, 23 de abril). *Generación de acelerogramas sintéticos*. XX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA CIVIL. Colegio de ingenieros del Perú.  
[https://georys.com/wp-content/uploads/2020/06/2018\\_GENERACION-DE-ACELEROGRAMAS-SINT%C3%89TICOS-%E2%80%93-Presentaci%C3%B3n.pdf](https://georys.com/wp-content/uploads/2020/06/2018_GENERACION-DE-ACELEROGRAMAS-SINT%C3%89TICOS-%E2%80%93-Presentaci%C3%B3n.pdf)
- Quintana, R. & Rojas, A. (2013). *Análisis y diseño de vigas-cabezal para estructuras con sistemas de encofrado tipo túnel*. [Trabajo especial de grado para optar al título de ingeniero civil]. Universidad Central de Venezuela.
- Rojas, J. (2012). *Comparación de parámetros de respuesta sísmica y de diseño para elementos estructurales principales de edificios en altura de hormigón armado, frente a los requerimientos de los decretos supremos 60 y 61*. [memoria para optar al título de ingeniero civil]. Universidad de Chile.
- Rojas Pizarro, G. (2016). *Estudio de sistemas de sostenimiento de suelo en excavaciones en edificios*. [Memoria para optar al título de ingeniero civil]. Universidad de Chile.
- Sáez, E., Pardo, G., & Ledezma, C. (2015). Seismic response of a pile-supported excavation on Santiago Gravel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.12.003>
- Sáez, E., & Ledezma, C. (2012). Earthquake-induced pressures on discontinuous piling support on Santiago Gravel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 72-83.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.007>

- Sánchez, J. (2021). *Modelación numérica de pilotes sometidos a carga axial pseudo – estática utilizando el programa MIDAS GTS NX*. [Trabajo de grado para optar por el título de ingeniera civil]. Universidad politécnica salesiana.
- Santamaria, S. Paniagua, W. 2019. *Sistemas de contención para excavaciones profundas. Procedimientos constructivos*. 4th Bolivian International Conference on Deep Foundations.
- Saucedo, M. 2015. *Sistemas seguros de contención para excavaciones profundas*. Pilotes Terratest Bolivia S.A. revista Presupuesto & Construcción. Año 25, N° 60.
- Saucedo, M. 2012. *Aplicación de Muros de Pilotes en obras viales en Lima*. Pilotes Terratest. Revista especializada Peruvias: 22 – 25
- Salas, F., Sáez, E., Ovalle, C., & Fernández, J. M. (2019). Análisis dinámico de una excavación profunda contenida mediante pilotes. *Obras y Proyectos*, 76-82.
- Salas, F. (2018). *Monitoring and dynamic analysis of a discontinuous pile-supported deep excavation in Santiago gravel*. Tesis MSc, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Silva, R. (2017). *GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS DEL TERREMOTO DE TOHOKU EN JAPÓN CONSIDERANDO EFECTOS DE SITIO*. [memoria para optar al título de ingeniero civil]. Universidad de Chile.
- Tintaya, C. O. J. (2007). Procesamiento digital de señales sísmicas con Matlab. *Revista de investigación de física*, 10(02), 45-50. <https://doi.org/10.15381/rif.v10i02.8581>
- Van Nguyen, D., Kim, D., & Choo, Y. W. (2023). Seismic responses, damage mechanisms and retrofitting methods for deep braced excavation: centrifuge test and numerical analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 168, 107829. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107829>
- Zhao, W., Han, J., Yang, C., Jia, P., Li, S., Li, Y., & Zhi-Qiang, Z. (2018). A numerical study on the influence of anchorage failure for a deep excavation retained by anchored pile walls. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(2), 168781401875677. <https://doi.org/10.1177/1687814018756775>

---

Zentner, I. (2014). A procedure for simulating synthetic accelerograms compatible with correlated and conditional probabilistic response spectra. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 226-233. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.03.012>