



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, \_28 de marzo de 2022\_\_

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

\_\_Julian Alberto Suaza cortes \_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_1.075.309.108\_\_,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado

Titulado: Análisis paramétrico de un sistema de contención, conformado mediante pilotes anclados en excavaciones urbanas.

presentado y aprobado en el año \_\_2022\_\_ como requisito para optar al título de

\_\_Ingeniero Civil\_\_\_\_\_;

Autorizo (amos) 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.

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.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE

Julian Alberto Suaza Cortes

Firma:



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Análisis paramétrico de un sistema de contención, conformado mediante pilotes anclados en excavaciones urbanas.

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Suaza Cortés	Julian Alberto

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Gil Hernandez	Jackson Andres

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Gil Hernández	Jackson Andrés

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero civil

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería civil

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2022

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 77

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



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

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: MIDAS GTS NX

**MATERIAL ANEXO:** N.A

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

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. _Pilotes anclados_	_Anchored piles_
2. _Método numérico_	_Numerical Method_
3. _MIDAS GTS NX_	_MIDAS GTS NX_
4. _Sistema de contención_	_Restraint system_
5. _Parámetros geométricos_	_Geometric parameters_

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

Actualmente, el sistema de pilotes anclados discontinuos es ampliamente usado como sistema de retención para excavaciones que se realizan en las zonas urbanas, debido a que utiliza métodos constructivos de muy fácil instalación, acceso en cascos urbanos y de bajo costo. Principalmente están conformados por una línea de pilotes discontinuos, anclajes y una viga cabezal en su parte superior, por ende, la selección en la geometría de cada uno de estos elementos influye para la eficiencia que tenga el sistema.

En este proyecto se busca evaluar el comportamiento de los parámetros geométricos que tiene este tipo de sistema de contención, a partir de un modelo numérico tridimensional (3D) ejecutado en el software MIDAS GTS NX, el cual permite esquematizar con ayuda de métodos de elementos finitos (MEF) la interacción suelo y estructura. Tomando como base los datos de campo registrados por inclinómetros en la excavación del edificio parque Oriente, Santiago de Chile los cuales están suministrados en la tesis del ingeniero Felipe



Salas, para la calibración del sistema. En el modelo calibrado se variaron cada uno de los sistemas con y sin viga cabezal, evaluando diferentes condiciones tales como la sobrecarga, inclinación de anclajes, diámetro, longitud y módulo de elasticidad para los pilotes.

En el cual, se determinó que las condiciones que mayor tienen incidencia en las deformaciones son la sobrecarga y el módulo de elasticidad. Por otro lado, la inclinación de anclajes tiene rango óptimo entre los 10° a 30°, debido a que, si estos elementos se encuentran a un mayor grado, se van a generar mayores deformaciones. Para los diámetros y longitudes, a medida que estos aumentan sus deformaciones serán menores. Por último, la viga cabezal juega un papel importante para el control de deformaciones en el tope del sistema de contención.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

Currently, the system of discontinuous anchored piles is widely used as a retaining system for excavations in urban areas, because it uses construction methods of very easy installation, access in urban areas, and low cost. They are mainly made up of a line of discontinuous piles, anchors, and a head beam at the top, therefore, the selection of the geometry of each of these elements influences the efficiency of the system.

This project seeks to evaluate the behavior of the geometric parameters of this type of containment system, based on a three-dimensional (3D) numerical model executed in MIDAS GTS NX software, which allows schematizing the interaction between soil and structure with the help of finite element methods (FEM). Based on the field data recorded by inclinometers in the excavation of the Parque Oriente building, Santiago de Chile, which are provided in the thesis of the engineer Felipe Salas, for the calibration of the system. In the calibrated model, each of the systems with and without head beam was varied, evaluating different conditions such as overload, anchor inclination, diameter, length, and modulus of elasticity for the piles.

In which, it was determined that the conditions that have the greatest impact on the deformations are the overload and the modulus of elasticity. On the other hand, the inclination of anchors has an optimum range between 10° to 30°, because, if these elements are at a higher degree, greater deformations will be generated. For diameters and lengths, as they increase, their deformations will be smaller. Finally, the head beam plays an important role in controlling deformations at the top of the containment system.



### APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: **Pablo Vélez Velásquez**

Firma:

Nombre Jurado: **Jaime Izquierdo Bautista**

Firma:



# **Análisis paramétrico de un sistema de contención, conformado mediante pilotes anclados en excavaciones urbanas.**

**Julián Alberto Suaza Cortés**

Universidad Surcolombiana de Colombia  
Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.  
Neiva, Colombia

2021





# **Análisis paramétrico de un sistema de contención, conformado mediante pilotes anclados en excavaciones urbanas.**

**Julián Alberto Suaza Cortés**

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

Ingeniero Civil

Director (a):

M.Sc. Jackson Andrés Gil Hernández

Línea de Investigación:

Excavaciones Urbanas

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

Neiva, Colombia

2021



*Ya somos el olvido que seremos.*

*El polvo elemental que nos ignora*

*Y que fue el rojo Adán y que es ahora todos los  
hombres y que no veremos.*

*Ya somos en la tumba las dos fechas*

*Del principio y el término. La caja*

*La obscena corrupción y la mortaja,*

*Los ritos de la muerte y las endechas.*

*No soy el insensato que se aferra*

*Al mágico sonido de su nombre; pienso con  
esperanza en aquel hombre que no sabrá que fui  
sobre la tierra.*

*Bajo el indiferente azul del cielo*

*Esta meditación es un consuelo.*

*Héctor Abad Faciolince*



## **Agradecimientos**

En primera instancia quiero agradecer a mis padres, ya que ellos me brindaron la oportunidad de crecer como persona ética y de tener la posibilidad igualmente de formarme académicamente. Son los seres que han estado conmigo ante cualquier eventualidad de mi vida, que respeto y admiro mucho.

De igual forma agradecer a mi director de tesis Ing. Jackson Andrés Gil Hernández, quien muy acomedidamente propuso y me acompañó en este proceso de investigación. De igual forma, como docente me inculco muchos principios, pasión por temas relacionados a la geotecnia, dedicación, respeto y compromiso. Factores que lo hacen un gran ser humano.

A mis amigos que estuvieron en el proceso de mi formación académica, que me apoyaron frente a las circunstancias buenas y malas. Quienes han estado pendiente de ante cualquier eventualidad y a las personas que me han hecho formar aún como profesional y un ser correctamente moral ante la sociedad.

Finalmente, a la Universidad Surcolombiana, por brindarme las herramientas para formarme como profesional. Al equipo de docentes que me acompañó en este proceso, quienes inculcaron todo su conocimiento y experiencias para formar unos excelentes profesionales en el marco de ingeniería civil.

## Resumen

Actualmente, el sistema de pilotes anclados discontinuos es ampliamente usado como sistema de retención para excavaciones que se realizan en las zonas urbanas, debido a que utiliza métodos constructivos de muy fácil instalación, acceso en cascos urbanos y de bajo costo. Principalmente están conformados por una línea de pilotes discontinuos, anclajes y una viga cabezal en su parte superior, por ende, la selección en la geometría de cada uno de estos elementos influye para la eficiencia que tenga el sistema.

En este proyecto se busca evaluar el comportamiento de los parámetros geométricos que tiene este tipo de sistema de contención, a partir de un modelo numérico tridimensional (3D) ejecutado en el software MIDAS GTS NX, el cual permite esquematizar con ayuda de métodos de elementos finitos (MEF) la interacción suelo y estructura. Tomando como base los datos de campo registrados por inclinómetros en la excavación del edificio parque Oriente, Santiago de Chile los cuales están suministrados en la tesis del ingeniero Felipe Salas, para la calibración del sistema. En el modelo calibrado se variaron cada uno de los sistemas con y sin viga cabezal, evaluando diferentes condiciones tales como la sobrecarga, inclinación de anclajes, diámetro, longitud y módulo de elasticidad para los pilotes.

En el cual, se determinó que las condiciones que mayor tienen incidencia en las deformaciones son la sobrecarga y el módulo de elasticidad. Por otro lado, la inclinación de anclajes tiene rango óptimo entre los  $10^\circ$  a  $30^\circ$ , debido a que, si estos elementos se encuentran a un mayor grado, se van a generar mayores deformaciones. Para los diámetros y longitudes, a medida que estos aumentan sus deformaciones serán menores. Por último, la viga cabezal juega un papel importante para el control de deformaciones en el tope del sistema de contención.

**Palabras clave:** Pilotes anclados, método numérico, MIDAS GTS NX, sistema de contención y parámetros geométricos.

## Abstract

Currently, the system of discontinuous anchored piles is widely used as a retaining system for excavations in urban areas, because it uses construction methods of very easy installation, access in urban areas, and low cost. They are mainly made up of a line of discontinuous piles, anchors, and a head beam at the top, therefore, the selection of the geometry of each of these elements influences the efficiency of the system.

This project seeks to evaluate the behavior of the geometric parameters of this type of containment system, based on a three-dimensional (3D) numerical model executed in MIDAS GTS NX software, which allows schematizing the interaction between soil and structure with the help of finite element methods (FEM). Based on the field data recorded by inclinometers in the excavation of the Parque Oriente building, Santiago de Chile, which are provided in the thesis of the engineer Felipe Salas, for the calibration of the system. In the calibrated model, each of the systems with and without head beam was varied, evaluating different conditions such as overload, anchor inclination, diameter, length, and modulus of elasticity for the piles.

In which, it was determined that the conditions that have the greatest impact on the deformations are the overload and the modulus of elasticity. On the other hand, the inclination of anchors has an optimum range between  $10^\circ$  to  $30^\circ$ , because, if these elements are at a higher degree, greater deformations will be generated. For diameters and lengths, as they increase, their deformations will be smaller. Finally, the head beam plays an important role in controlling deformations at the top of the containment system.

**Keywords:** Anchored piles, numerical method, MIDAS GTS NX, restraint system, and geometric parameters.

# Contenido

	Pág.
Resumen .....	VIII
Lista de figuras .....	XII
Lista de tablas .....	XIV
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVI
Capítulo 1.....	20
<b>1. Introducción .....</b>	<b>20</b>
1.1 Antecedentes .....	22
1.2 Justificación .....	24
1.3 Objetivos.....	25
1.3.1 Objetivo general .....	25
Capítulo 2.....	26
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>26</b>
2.1 Sistema de contención mediante pilotes anclados.....	26
2.1.1 Pilotes anclados discontinuos.....	27
2.2 Anclajes activos.....	29
2.2.1 Zona o bulbo de anclaje.....	29
2.2.2 Zona libre .....	30
2.2.3 Cabeza.....	30
2.3 Método de elementos finitos (MEF).....	31
2.4 Software MIDAS GTS NX.....	33



---

2.4.1	Modelo constitutivo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS-Small)	33
<b>Capítulo 3.....</b>		<b>39</b>
<b>3.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>39</b>
3.1	Propiedades mecánicas y geométricas del perfil del suelo.....	40
3.2	Propiedades mecánicas y geométricas de la estructura de contención ...	44
3.2.1	Sistema de pilotes.....	45
3.2.2	Sistema de anclajes.....	45
3.2.3	Viga Cabezal .....	47
3.3	Modelación del caso de estudio .....	48
3.4	Calibración del caso de estudio .....	54
3.5	Análisis paramétrico.....	55
3.5.1	Sobrecarga .....	55
3.5.2	Inclinación de Anclajes .....	56
3.5.3	Diámetros .....	57
3.5.4	Longitud y módulo de elasticidad (E) .....	57
<b>Capítulo 4.....</b>		<b>59</b>
<b>4.</b>	<b>Análisis de resultados.....</b>	<b>59</b>
4.1.1	Sobrecarga.....	59
4.1.2	Inclinación de anclajes.....	61
4.1.3	Diámetros .....	64
4.1.4	Longitud y módulo de elasticidad (E) .....	66
<b>Capítulo 5.....</b>		<b>69</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>69</b>
5.1	Conclusiones.....	69
5.2	Recomendaciones .....	71
<b>Bibliografía.....</b>		<b>75</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Sistema Sistema de retención por pilotes ancados, para la construcción del edificio K6, Helsinki- Finlandia (Infrastructure news, 2017).	21
<b>Figura 2-1:</b> a) Pantalla de pilotes continuos secantes, b) Pantalla de pilotes continuos tangentes y c) Pantalla de pilotes discontinuos. Tomado de (GEO5, 2021).	27
<b>Figura 2-2:</b> a) Zona con reforzada de concreto, b) Zona con inyección de lechada y c) Zona estabilizada con madera. Tomado de (Keller, 2019).	28
<b>Figura 2-3:</b> Elementos que componen un sistema de pilotes anclados discontinuos.	28
<b>Figura 2-4:</b> Componentes principales de un sistema de anclajes. Tomado de (García, 2020)	30
<b>Figura 2-5:</b> Elemento aislado, donde $x$ y $y$ ; son las coordenadas cartesianas del nodo $i$ . Tomado de (Morales, 2013).	31
<b>Figura 2-6:</b> Representación típica de la variación de rigidez en función de modulo cortante y la deformación cortante, comparando los rangos para problemas geotécnicos típicos y diferentes ensayos. Tomado de (Zimmermann et al., 2010).	32
<b>Figura 2-7:</b> Relación hiperbólica esfuerzo-deformación para ensayos triaxiales. Tomado de (Leal et al., 2009).	36
<b>Figura 3-1:</b> Metodología de desarrollo para esta investigación.	40
<b>Figura 3-2:</b> Zona de la exploración geofísica y lugar de excavación en Santiago de Chile.	41
<b>Figura 3-3:</b> Esquema geométrico del perfil de suelo.	43
<b>Figura 3-4:</b> Esquema geométrico y posicionamiento del sistema de contención mediante pilotes anclados discontinuos arriostrados lateralmente por anclajes.	44
<b>Figura 3-5:</b> Vista en plata de la separación ( $s$ ) de los pilotes para el caso de estudio.	45
<b>Figura 3-6:</b> Modelación del caso de estudio mediante el software MIDAS GTS NX.	48
<b>Figura 3-7:</b> a) Modelado geométrico, b) Modelado del sistema con su enmallado y c) Modelado con sus condiciones de frontera.	49
<b>Figura 3-8:</b> Dimensiones de profundidades y etapa de cada excavación.	50

---

<b>Figura 3-9:</b> Enmallado general del caso de estudio.	51
<b>Figura 3-10:</b> Deformaciones registradas para la etapa a. de la excavación 2 y b. de la excavación 3 de acuerdo a la tabla 3-15.	54
<b>Figura 3-11:</b> Ubicación de la instrumentalización de los inclinómetros para el registro de las deformaciones.	55
<b>Figura 4-1:</b> Sobrecarga con viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.	59
<b>Figura 4-2:</b> Sobrecarga sin viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.	60
<b>Figura 4-3:</b> Sobrecarga con y sin viga cabezal de las deformaciones en el tope para la excavación 3.	61
<b>Figura 4-4:</b> Inclinación de anclajes con viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.	61
<b>Figura 4-5:</b> Inclinación de anclajes sin viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.	62
<b>Figura 4-6:</b> Inclinación de anclajes con y sin viga cabezal de las deformaciones en el tope para la excavación 3.	63
<b>Figura 4-7:</b> Diámetros con viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.	64
<b>Figura 4-8:</b> Diámetros sin viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.	64
<b>Figura 4-9:</b> Diámetros con y sin viga cabezal de las deformaciones en el tope para la excavación 3.	66
<b>Figura 4-10:</b> Deformaciones en el tope de la excavación con un módulo de elasticidad de 30 GPa a diferentes longitudes del pilote.	66
<b>Figura 4-11:</b> Deformaciones máximas registradas para la excavación 3 con diferentes módulos de elasticidad y longitud del pilote para el sistema a. con viga cabezal y b. sin viga cabezal.	67

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Comportamiento de modelos de acuerdo al tipo de suelo y análisis. Línea discontinua: puede usarse, pero no es recomendado en términos de calidad de resultados, Línea continua: se puede aplicar; relleno verde modelo mejor recomendado. Tomado de (Zimmermann et al., 2010).	34
<b>Tabla 2-2:</b> Parámetros para la Rigidez del suelo.	37
<b>Tabla 2-3:</b> Parámetros de falla, similares al modelo Mohr- Coulomb.	37
<b>Tabla 2-4:</b> Parámetros adicionales para pequeñas deformaciones.	38
<b>Tabla 3-1:</b> Parámetros para la Rigidez de la primera deposición, HS- Small.	41
<b>Tabla 3-2:</b> Parámetros de falla de la primera deposición, HS- Small.	42
<b>Tabla 3-3:</b> Parámetros adicionales de la primera deposición, HS-Small.	42
<b>Tabla 3-4:</b> Parámetros para la rigidez de la segunda deposición, HS-Small.	42
<b>Tabla 3-5:</b> Parámetros de falla de la segunda deposición, HS- Small.	43
<b>Tabla 3-6:</b> Parámetros adicionales de la segunda deposición, HS-Small.	43
<b>Tabla 3-7:</b> Propiedades mecánicas de los pilotes.	45
<b>Tabla 3-8:</b> Propiedades geométricas de los pilotes.	45
<b>Tabla 3-9:</b> Valores de tensiones.	46
<b>Tabla 3-10:</b> Propiedades mecánicas de los anclajes.	46
<b>Tabla 3-11:</b> Propiedades geométricas para la longitud libre de los anclajes.	47
<b>Tabla 3-12:</b> Propiedades geométricas para el bulbo de los anclajes.	47
<b>Tabla 3-13:</b> Propiedades geométricas para la viga cabezal.	48
<b>Tabla 3-14:</b> Nomenclatura usada para las mallas de la zona de excavación.	50
<b>Tabla 3-15:</b> Sistema constructivo implementado para el caso de estudio.	53
<b>Tabla 3-16:</b> Casos de análisis evaluando la sobrecarga.	56
<b>Tabla 3-17:</b> Casos de análisis evaluando la inclinación de anclajes.	56
<b>Tabla 3-18:</b> Casos de análisis evaluando los diámetros.	57

**Tabla 3-19:** Caso de análisis evaluando las longitudes de pilotes y su módulo de elasticidad. 58

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$C'$	Cohesión efectiva	KPa	Ensayo triaxial
$E_{50}$	Módulo de rigidez dependiente de la tensión de confinamiento para la carga primaria.	KPa	Ec. 2.3
$E_{50}^{ref}$	Rigidez secante en ensayos triaxiales	KPa	Ec. 2.3
$E_i$	Rigidez inicial	-	Ec. 2.2
$E_{oed}$	Módulo de endurecimiento	KPa	Ec. 2.8
$E_{oed}^{ref}$	Rigidez tangente para carga primaria edométrica	KPa	Ec. 2.8
$E_{ur}$	Módulo dependiente a la tensión	KPa	Ec. 2.7
$E_{ur}^{ref}$	Rigidez en descarga-recarga	KPa	Ec. 2.9
$e$	Relación de vacíos	-	$V_v/V_s$
$G$	Módulo cortante	-	$\tau/\gamma$
$G_0$	Módulo de cortante para deformaciones muy pequeñas	-	Figura 2-6
$G_0^{ref}$	Modulo cortante de referencia para deformaciones muy pequeñas.	KPa	$\varepsilon < 10^{-6}$
$G_{ref}$	Módulo de corte referencial	KPa	Ec. 2.4
$G_s$	Módulo secante de cortante	1	Ec. 2-9
$K_{0,nc}$	Coeficiente normalmente consolidado	1	Ec. 2-8
$p'$	Presión de confinamiento	KPa	Ec 2.4
$p'_{ref}$	Presión de confinamiento referencial	KPa	100

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$q$	Esfuerzo desviador	KPa	Ec. 2.1
$q_a$	Asíntota a la resistencia al corte	KPa	Ec. 2.6
$q_f$	Esfuerzo desviador ultimo	KPa	Ec. 2.5
$R_f$	Relación de falla	-	$< 1.0$
$V$	Volumen	$m^3$	$\iiint dx dy dz$
$W$	Peso	N	$m \times g$

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$a$	Coefficiente	-	Ec. 2.9
$\beta$	Angulo de inclinación	$^\circ$	Tabla 3-11
$\gamma$	Deformación tangencial	rad	$\tau/G$
$\gamma'$	Peso específico	KN/m <sup>3</sup>	$W/V$
$\gamma_{0.7}$	Deformación reducida al 70%	rad	Ec. 2-9
$\gamma_s$	Deformación cortante del suelo	rad	Figura 2-6
$-\varepsilon_1$	Deformación axial	-	Ec. 2-1
$\nu_{ur}$	Relación de Poisson en descarga-recarga	-	Table 2-4
$\sigma'_1$	Esfuerzo secundario	KPa	Figura 2-7
$\sigma'_3$	Esfuerzo principal	KPa	Figura 2-7
$\sigma_t$	Corte de tensión y resistencia a la tracción	KPa	Tabla 2-3
$\sigma_{tension}$	Resistencia a la tracción	KPa	Tabla 2-4
$\phi'$	Angulo de fricción efectiva	$^\circ$	Ensayo triaxial
$\tau$	Esfuerzo cortante	KPa	$G \times \gamma$
$\psi$	Ángulo de dilación	$^\circ$	Tabla 2-3

## Subíndices

Subíndice	Término
s	Secante y/o suelo
0.7	Reducimiento del 70%

## Superíndices

Superíndice	Término
<i>ref</i>	Referencia
<i>m</i>	Dependencia de la rigidez al estado modelo

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>2D</i>	Bidimensional
<i>3D</i>	Tridimensional
<i>CPTU</i>	Ensayo de penetración con piezocono
<i>DMT</i>	Prueba de dilatómetro de Marchetti
<i>GW-GC</i>	Grava arenosa bien gradada
<i>HS-Small</i>	Hardening Soil para pequeñas deformaciones
<i>MEF</i>	Método de elementos finitos
<i>PMT</i>	Prueba del medidor de presión
<i>SLS</i>	Análisis de estado límite de servicio
<i>ULS</i>	Análisis de estado límite último





# Capítulo 1

## 1. Introducción

Uno de los principales factores de la ingeniería es la influencia del suelo para el desarrollo de las estructuras, aún más cuando estas obras cuentan con sótanos, parqueaderos o pisos por debajo de la cota del terreno, principalmente aquellas que se ubican en las zonas urbanas. Por lo tanto, una de las problemáticas presentes en estas obras de gran magnitud, ocurren en el momento de ejecutar actividades de excavaciones; comprometiendo la estabilidad en las edificaciones colindantes y en si la vida de las personas.

Actualmente existen diversos sistemas de retención que dan solución a la estabilidad del terreno debido a las actividades generadas por las excavaciones; como lo son los sistemas de muros anclados excavados, muros pantallas con anclajes y/o los sistemas de pilotes anclados (Lacera, 2015). En este último sistema de contención, se puede encontrar los pilotes anclados discontinuos, los cuales han demostrado tener una amplia variedad de beneficios; particularmente presentan eficacia en suelos de grava rígidas, en depósitos fluviales y en zonas donde los niveles freáticos se encuentren a una considerable profundidad, igualmente es un sistema económico y de fácil instalación (Hong et al., 2022), que ha demostrado mejorar su capacidad controlando las deformaciones cuando son arriostros lateralmente por múltiples niveles de anclajes (Bilgin, 2009).

Los sistema de pilotes anclados discontinuo han sido usados en múltiples proyectos de gran magnitud; como la construcción de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile (Universidad de Chile, 2013), Edificio de la Asamblea Legislativa Plurinacional en la Paz, Bolivia (Sulzer, 2015), el Edificio K6 en Helsinki, Finlandia

(Infrastructure news, 2017) como se puede apreciar en la Figura 1-1 y el Edificio Britania localizado en la calle Balmoral las Condes, Chile (Salas Fontecilla, 2018).



**Figura 1-1:** Sistema de retención por pilotes anclados, para la construcción del edificio K6, Helsinki-Finlandia (Infrastructure news, 2017).

De igual forma, es un sistema de contención poco convencional usado en Colombia, debido a que es un país en vía de desarrollo, por el cual, actualmente está presentando un incremento significativo en el sector de la infraestructura en las zonas urbanas. En donde algunas ciudades presentan características óptimas para implementar este sistema de retención para excavaciones, como lo es la ciudad de Neiva, en la cual se puede encontrar una composición de depósitos fluviales compuestas por gravas rígidas y zonas donde los niveles freáticos están a grandes profundidades. (Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, 2006).

Por otro lado, son diferentes los autores que han evaluado el sistema de contención mediante pilotes anclados, realizando análisis paramétricos en el suelo y la estructura (Wang et al., 2019). Tal es el caso de evaluar este sistema con diferentes tipos de arena (baja, media y densa), variando las profundidades de empotramiento, rigidez y posicionamiento del pilote, para sistemas dobles (Emarah & Selenn, 2018), el uso de rellenos, enfrente y detrás del muro de pilotes y la influencia del método constructivo (Bilgin, 2010), incluso el comportamiento que tiene el ángulo de inclinación en pilotes para la falla general y de volcamiento (Diao et al., 2021). Sin embargo, a pesar de los avances que existen, a la fecha no hay claridad de la incidencia en conjunto que tienen los

parámetros del sistema de pilotes discontinuo (longitud del pilote, diámetros, viga cabezal, inclinación de anclajes, sobrecargas y módulos de elasticidad).

Por ende, este proyecto propone investigar la incidencia que tiene el sistema de pilotes anclados discontinuos arriostrados lateralmente mediante anclajes, en tanto a su geometría y composición, a partir de un modelo numérico calibrado con datos de campo. Esta calibración se llevará a cabo con el software MIDAS GTS NX, en base a las deformaciones registradas en campo mediante la instrumentación de inclinómetros, obtenidos en la excavación para el Edificio Parque Oriente localizado en la calle Cerro el Plomo con calle Alonso de Córdova, Santiago de Chile (Salas Fontecilla, 2018).

El presente proyecto de investigación tiene restricciones muy comunes, ya que se trabajará con la información del sistema de contención del registro de campo anteriormente mencionado. De igual forma, el proyecto no contará con apoyo económico de ninguna entidad estatal por lo que es imposible simular el sistema original.

Por otro lado, no se realizarán estudios y pruebas a escala del comportamiento de la excavación, por lo que, este proyecto se enfocará estrictamente en el análisis numérico, que además estará sujeto a las restricciones del programa MIDAS GTS NX. Con lo cual se busca proponer e investigar soluciones variables que no se hayan tenido en cuenta, que a su vez sirvan a mejorar la eficiencia de la estabilidad de la excavación y determinar la influencia que tienen los parámetros geométricos en este sistema de contención.

## 1.1 Antecedentes

Los sistemas de contención para excavaciones actualmente han tenido una amplia gama en el campo de la investigación, debido a que son estructuras que comprometen la seguridad y estabilidad en las zonas donde se apliquen. En ellos se pueden encontrar sistemas de muros anclados excavados, muros pantallas con anclajes y/o los sistemas de pilotes anclados (Lacera, 2015). Este último sistema cuenta con varias modalidades de estudios, debido a la diversas ventajas y la versatilidad que presente en el campo de aplicación (GEO5, 2021).

Se han realizado estudios para este sistema de contención a partir de las afectaciones que tiene los diversos parámetros del suelo y la estructura. Como es el caso de la incidencia

de la inclinación de los pilotes para la falla general y volcamiento, en donde la universidad de Tianjin diseñó un modelo numérico a partir de la discontinuidad propuesta por Smith & Gilbert (2007), concluyendo que a medida que se cambia el ángulo de inclinación, cambia la falla de volcamiento a la general, de igual forma al inclinar los pilotes se pueden reducir costos y tiempos de construcción en la excavación (Diao et al., 2021). El ingeniero Hetham Ramadan investigó como las diferentes profundidades de penetración para los pilotes (Bilgin, 2009), afectan las deformaciones y momentos del sistema de contención, en donde encontró que al aumentar la profundidad de penetración del pilote puede ayudar a reducir las deformaciones y los momentos flectores (Ramadan, 2017).

En el 2017 se realizó un estudio de análisis paramétricos a partir de un sistema de pilotes anclados secantes (GEO5, 2021) en condiciones dinámicas con base en la construcción del edificio comercial del banco de Etiopia. En el modelo numérico se registraron las deformaciones a diferentes profundidades de excavación, diámetro del pilote y rigidez del anclaje. El cual determinó que a medida que se aumentaba la profundidad de la excavación aumentan las fuerzas de desequilibrio, generando un aumento en la tensiones y el desplazamiento, para los diámetros y la rigidez del anclaje, cuando estos aumentan son menores las deformaciones incluso cuando en estos sistemas se colocan más de una línea de anclajes (Emuriat, 2017).

En la Universidad del Cairo, facultad de ingeniería se recreó por medio de un ensayo de laboratorio unas condiciones de terreno para un sistema de pilotes anclados mediante una y dos líneas de anclajes, con el objetivo de evaluar el comportamiento de este elemento. En donde se evidenció, que se produjo reducción en los valores de los momentos flectores máximos, además reducción en los valores de fuerza de los anclajes para el caso de las dos líneas de anclajes (Emarah & Selenn, 2016). Otro estudio de este elemento como sistema de arriostamiento para este tipo de sistemas de contención es el análisis de falla y coeficiente de seguridad, donde se tomó como base de estudio los registros de la excavación realizada en Shenyang, China. El modelo numérico registra que las propiedades peligrosas a falla aparecen en la parte superior de del sistema de pilotes o en la región cercana al fondo de la excavación (Zhao et al., 2018).

Incluso una de las pocas investigaciones para el sistema de pilotes anclados discontinuos es la del ingeniero Felipe Salas (2018). El cual, calibró un modelo numérico estático y

dinámico con las deformaciones y presiones que se registraron en la construcción del edificio parque Oriente. Realizando ensayos para elegir las mejores condiciones que representen el suelo en modelo Hardening- Soil para pequeñas deformaciones (Salas Fontecilla, 2018).

Por ende, es limitada la información que se tiene en el auge investigativo para el sistema de contención por pilotes anclados discontinuos arriostrado lateralmente mediante anclajes en excavaciones profundas. En parámetros como la influencia que tiene el posicionamiento de los pilotes con su diámetro afectando así el distanciamiento entre ellos, su profundidad, la inclinación efectiva de anclaje, el módulo de elasticidad y el comportamiento que tienen la sobrecargar colindantes a la zona de excavación.

## 1.2 Justificación

En Colombia debido a la diversidad geomorfológica que cuenta a lo largo del territorio, debido su sistema montañoso. Se pueden encontrar condiciones muy similares a los terrenos en donde se dan uso de este sistema de contención mediante pilotes anclados y arriostrados lateralmente mediante anclajes (Salas Fontecilla, 2018). Como lo es en el caso de la ciudad de Neiva, el cual cuenta con depósitos fluviales de consistencia rígida y en algunas zonas los niveles freáticos se encuentran a una gran profundidad (Universidad Nacional de Colombia, 2006). Al ser una ciudad con tendencia de crecimiento en su infraestructura urbana, es indiscutible considerar la incorporación de este sistema de contención para las excavaciones.

Por lo anterior, el presente proyecto pretende ampliar la información sobre el sistema de pilotes anclados y arriostrados lateralmente mediante anclajes para excavaciones profundas. En donde se evaluará la incidencia que tienen los pilotes en su geometría y su composición, con ayuda de un modelo numérico calibrado a partir de datos de campo. EL cual se llevará a cabo de software MIDAS GTS NX en base a las deformaciones registrados en campo por los inclinómetros, que se obtuvieron en una excavación en Santiago de Chile del Edificio Parque Oriente localizado en la calle Cerro el Plomo con calle Alonso de Córdova (Salas Fontecilla, 2018). Para que este sistema sea incorporado en futuras obras que se quieran realizar en el marco del crecimiento urbano regional.

## 1.3 Objetivos

Realizar un análisis paramétrico de un sistema de contención conformado por pilotes anclados, a partir de la calibración de un modelo numérico de elementos finitos, empleando el software MIDAS GTS NX.

### 1.3.1 Objetivo general

- Calibración de un modelo numérico en elementos finitos con base en deformaciones registradas en campo.
- Realizar un análisis paramétrico determinando la incidencia que tiene la longitud del pilote, el diámetro, la inclinación de anclajes, la sobrecarga y el modelo de elasticidad para la estructura de contención.
- Analizar la incidencia que tiene el uso de una viga cabezal en el tope de la estructura de contención.

# Capítulo 2

## 2. Marco teórico

### 2.1 Sistema de contención mediante pilotes anclados

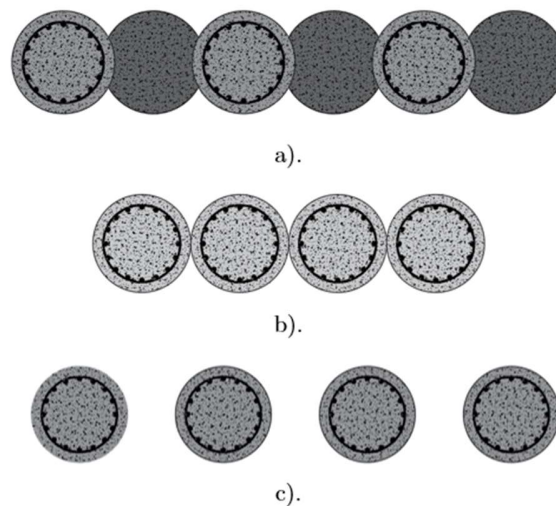
Los pilotes anclados son ampliamente usados como sistema de contención para las excavaciones de cimientos, túneles, pozos de gran diámetro, paredes de los estribos para los puentes o sistema de protección de taludes y a menudo son arriostrados lateralmente por filas de anclajes postensados o puntales de acero (Keller, 2019). Por lo general sus diámetros están entre los 0.8 a 1 m, en donde debido a que esto son elemento que se pueden encontrar con un alto grado de esbeltez y reducir considerablemente las deformaciones que se presentan en el suelo, siendo sistemas óptimos para cuando se realizan excavaciones con estructuras colindantes a la zona a intervenir.

Se ha demostrado ser sistemas económicos a emplear cuando existen excavaciones a grandes profundidades ya que poseen una instalación rápida y sencilla. Debido a que muchas veces estos pilotes son hincados al terreno, de acuerdo a las condiciones que se presenten y al estudio de suelos y así poder optimizar el sistema constructivo y los tiempos de ejecución.

Este sistema se puede implementar en cualquier tipo de suelos, sin embargo, su comportamiento varía dependiendo de la distancia en la que los pilotes se encuentren. Por



lo anterior, se pueden clasificar los pilotes anclados de la siguiente forma, como se muestra en la Figura 2-1:



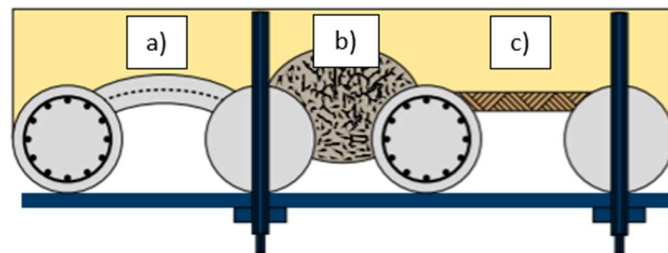
**Figura 2-1:** a) Pantalla de pilotes continuos secantes, b) Pantalla de pilotes continuos tangentes y c) Pantalla de pilotes discontinuos. Tomado de (GEO5, 2021).

En donde, de acuerdo a la Figura 2-1 c) “Pantalla de pilotes discontinuos” o pilotes anclados discontinuos, es el sistema que se va a abarcar en la siguiente investigación.

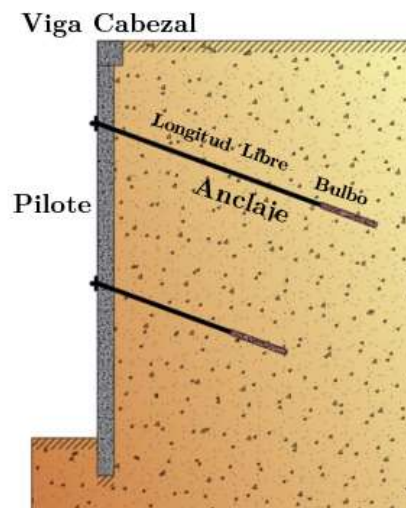
### 2.1.1 Pilotes anclados discontinuos

Este sistema principalmente se caracteriza por tener una distancia axial mayor al diámetro de los pilotes. En algunas ocasiones esta zona se rellena con una pared reforzada de concreto, también se estabilizan con madera aislante frente al suelo excavado o se da uso de inyecciones de lechada entre la separación de los pilotes, como se muestra en la Figura 2-2.

Por lo general, los pilotes anclados discontinuos están compuesto por una viga cabezal, la cual se encarga de distribuir las cargas, evitar el punzonamiento del pilote y como una medida de mitigación para el improbable caso de que un anclaje pierda carga. Esta viga es de concreto armado o cualquier material que se comporte de la misma forma, está ubicada directamente contra los pilotes o mediante perfiles de acero, como se muestra en la Figura 2-3.



**Figura 2-2:** a) Zona con reforzada de concreto, b) Zona con inyección de lechada y c) Zona estabilizada con madera. Tomado de (Keller, 2019).



**Figura 2-3:** Elementos que componen un sistema de pilotes anclados discontinuos.

Por otro lado, la separación máxima que pueden existir entre pilotes se determina a partir de los parámetros de resistencia del suelo y el módulo de rigidez del mismo (Presupuesto & Construcción, 2015). En cuanto tengamos un suelo con características de una rigidez alta su separación será más óptima, los empujes del suelo se distribuyen hacia los pilotes generando en ellos un efecto arco. De igual forma, el nivel freático es un factor clave para determinar el uso de este tipo de sistemas de retención; debido a que, si este se encuentra localizado a mayores profundidades, no se verá afectado por problemas de drenaje el sistema de pilotes anclados discontinuo.

Por último, se conoce que los pilotes son elementos muy rígidos, capaces de soportar grandes cargas, sin embargo, al ser elementos tan esbeltos a medida que van incrementando su profundidad las deformaciones generadas por los empujes del suelo son

mayores. Por lo tanto, necesitan un elemento horizontal que pueda ayudar a reducir estas deformaciones y los momentos flectores que se generan en el sistema de pilotes. Este sostenimiento se garantiza mediante la incorporación de anclajes, por lo general se da uso a los anclajes activos o postensados.

## 2.2 Anclajes activos

Los anclajes son un tipo de elemento que transmite esfuerzos a tracción desde la superficie del terreno hasta una zona interior del suelo en la que se encuentre. Existen diferentes utilidades de estos elementos, como lo son:

- Estabilización de taludes
- Mejoramientos al deslizamiento, trabajando como elementos a flexión y/o tracción
- Elementos para contención de terrenos o excavaciones profundas.
- Refuerzos de estructuras como presas, muros y túneles.
- Protección contra la supresión.

Dentro de los grupos de anclajes se pueden caracterizar los anclajes activos o postensados, los cuales se caracterizan por lo general en tener una carga de tensado posterior a su ejecución, que no sea inferior al 50% de la máxima prevista (Garcia, 2020). De igual forma, son elementos conformados por cables de alta resistencia que se introducen en el suelo luego de una perforación previa y luego son inyectados con una lechada de cemento para conformar el bulbo que proporcionará la interacción entre el anclaje y el suelo circundante.

Existen diferentes componentes en las cuales se puede constituir un sistema de anclajes, pues muchos de ellos varían dependiendo del mecanismo de uso, zona a implementar y grado de complejidad de la obra. Pero por lo general, para los anclajes activos se tiene la siguiente clasificación:

### 2.2.1 Zona o bulbo de anclaje

Es la zona donde se encuentra la parte solididad del terreno en profundidad, encargada de transferirle los esfuerzos. Su elaboración varía de acuerdo al sistema constructivo empleado. Se basa en que es una parte fija ya que no se debe mover durante el tensado

ni durante la movilización del empuje activo. En la práctica se puede mover algo, pero este movimiento no debe perturbar mucho el terreno debido a que desaparecería la capacidad del anclaje (Yepes, 2020). Esta zona se encuentra representada en la parte inferior de la figura 2-4.

### 2.2.2 Zona libre

Es la parte del anclaje situada entre la cabeza y el bulbo o zona de anclaje, dotada de libre alargamiento (Burgos, 2001) como se muestra en la figura 2-4. En ella se adopta una deformación debido a que provocado la progresiva puesta en carga del anclaje. Puede garantizarse la independencia del anclaje respecto al terreno en esta zona mediante camisas de PVC o metálicas. Sin embargo, debe contar con su respectiva protección contra la corrosión (Yepes, 2020).

### 2.2.3 Cabeza

Es la unión de la armadura a la placa de apoyo, en la que se ejerce la fuerza estabilizadora sobre la estructura. Esta parte externa del anclaje es capaz de transmitir la carga del tirante a la superficie del terreno o a la estructura a anclar. Esta zona se compone a su vez normalmente de: una placa de reparto, cuñas o tuercas, porta cuñas y protección. Incluye la transición a la zona libre (Yepes, 2020). Como se muestra en la parte superior de la figura 2-4.

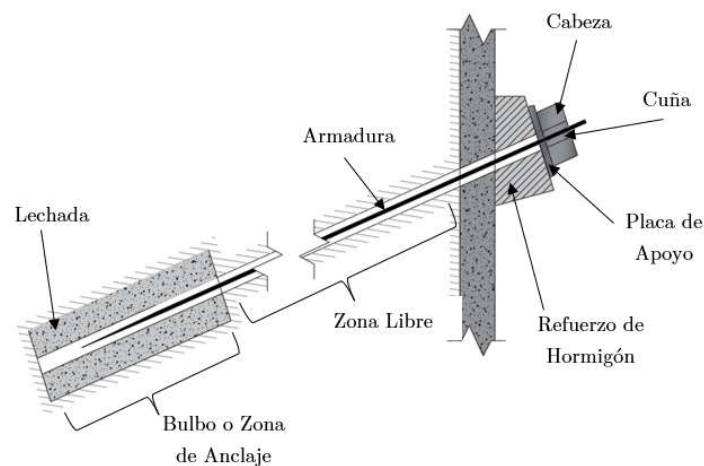
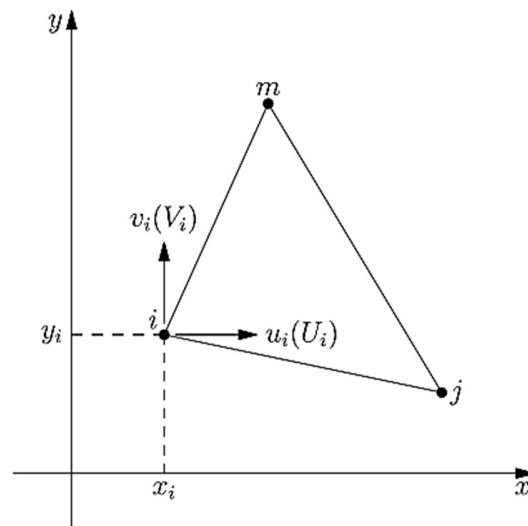


Figura 2-4: Componentes principales de un sistema de anclajes. Tomado de (García, 2020)

## 2.3 Método de elementos finitos (MEF)

Una de las técnicas actuales empleadas para el análisis de la ingeniería es el sistema por el método de elementos finitos (MEF). El cual se basa en una aproximación matemática mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Este sistema consiste en dividir un elemento en un número finito de partes, en donde el comportamiento es definido mediante parámetros adyacentes asociados a ciertos puntos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión que en conjunto conforman una malla de elementos finitos (Morales, 2013) como se muestra en la figura 2-5. Los cálculos se realizan sobre esta malla o discretización, a partir de un proceso de iteraciones que se puede realizar de manera más ágil con programas especializados. Mediante el MEF se puede realizar y analizar comportamientos como la transmisión de calor, mecánica de fluidos, velocidades, desplazamientos, deformaciones y tensiones (Ochoa et al., 2009).

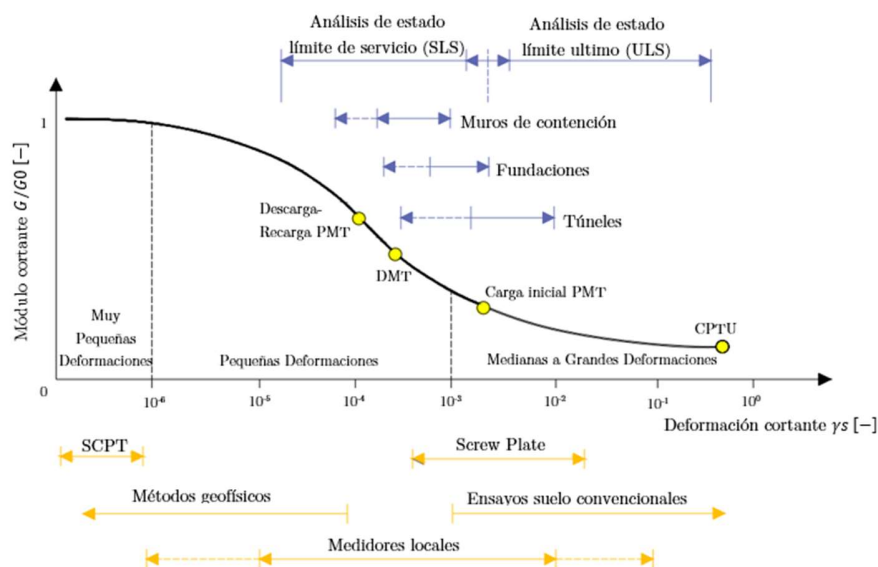


**Figura 2-5:** Elemento aislado, donde  $x$  y  $y$ ; son las coordenadas cartesianas del nodo  $i$ . Tomado de (Morales, 2013).

Para la geotecnia el MEF se representa el suelo como un medio elastoplástico, permitiendo modelar la interacción suelos y estructura. Debido a que busca realizar un análisis de esfuerzo y deformación que puede presentar el terreno. Por estas razones, el comportamiento del suelo es un fenómeno que no se puede predecir con un simple modelo lineal constitutivo basado en un análisis numérico. Pues en este, se presenta situaciones elásticas y plásticas no lineales, con condiciones como deformaciones, en donde se pueden

aplicar esfuerzos plásticos irreversibles, el tiempo histórico de cargas que reciba el terreno, ya que se puede compactar o dilatar y su rigidez puede depender de la magnitud de los niveles de esfuerzo. De hecho, el comportamiento del suelo es considerado elástico en el rango de las pequeñas deformaciones como se muestra en la figura 2-6, en donde se representa el módulo cortante y las deformaciones cortantes.

Por eso actualmente existen diferentes modelos para poder represar el comportamiento del suelo, para los casos lineales -elásticos y perfectamente plásticos en el análisis de MEF. Como es el caso del modelo Mohr Coulomb que es elásticos linear , modelos elastoplásticos como el Cam-Clay y Cam-Clay modificado y modelos avanzados no lineares elastoplástico para el caso de Hardening Soil o Hardening Soil para pequeñas deformaciones (Zimmermann et al., 2010). Este último es capaz de representar cuando un suelo tiene una alta rigidez a muy pequeñas deformaciones; el desarrollo de la deformación alrededor de la vecindad cercana a la zona de impacto. Como es el caso de los muros de contención o excavaciones de túneles, pues en ellos la rigidez se degrada aumentando las deformaciones del suelo en las proximidades de descarga límites y reduciéndolos apropiadamente lejos de la zona de descarga (Addenbrooke et al., 1997).



**Figura 2-6:** Representación típica de la variación de rigidez en función de modulo cortante y la deformación cortante, comparando los rangos para problemas geotécnicos típicos y diferentes ensayos.

Tomado de (Zimmermann et al., 2010).

## 2.4 Software MIDAS GTS NX

Midas GTS NX es un programa desarrollado para realizar análisis mediante el método de elementos finitos. El cual se enfoca en resolver problemas 3D y 2D de geotecnia, como: cimentaciones profundas, excavaciones, sistema de túneles, análisis de flujo, análisis de consolidación, diseño de terraplenes, análisis de estabilidad de taludes y análisis dinámicos. El cual permite crear un análisis constructivo etapa por etapa de parámetros relacionados directamente con el diseño y la construcción. De igual forma el programa soporta varias condiciones (Características del suelo, nivel del agua etc..) y metodologías analísticas para simular fenómenos reales.

Creando escenarios para todo tipo de condiciones de campo que pueden ser simulados usando métodos de análisis no lineal (como son el análisis estático lineal/no-lineal, el análisis dinámico lineal/no-lineal, análisis de infiltraciones y consolidación, análisis de estabilidad de taludes) y varios análisis acoplados (como son esfuerzo-filtraciones, estabilidad-esfuerzo, estabilidad-filtraciones y análisis acoplado no-lineal estabilidad dinámico, entre otros) (MIDAS, 2014).

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

El modelo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS-Small) es una extensión del modelo Hardening Soil (HS). Este permite simular el comportamiento de varios tipos de suelos tanto cohesivos como granulares como se muestra en la tabla 2-1 (Leal et al., 2009).

Este modelo es una aproximación de segundo orden, el cual tiene en cuenta el aumento de la rigidez del suelo con pequeñas deformaciones. Debido a que cuando existen estas pequeñas deformaciones el suelo muestra un incremento no lineal de la rigidez. Por lo tanto, este modelo también conocido como endurecimiento reproduce fenómenos macroscópicos que presenta el suelo tales como:

- Densificación: La disminución del volumen en el suelo debido a las deformaciones plásticas.
- Rigidez dependiente de la tensión: Fenómenos comúnmente observados de rigidez creciente módulos con tensión de confinamiento creciente.

- Historial estrés del suelo: Efectos previos a la consolidación.
- Rendimiento plástico: Desarrollo de deformaciones irreversibles que alcancen un rendimiento crítico.
- Dilatación: Deformaciones volumétricas negativas durante el cizallamiento.
- Fuerte variación de rigidez: Aumento de las amplitudes de la deformación cortante en el dominio de las deformaciones pequeñas, como se muestra en la figura 2-6.
- Relación tensión-deformación elástica no-lineal: se aplica en el rango de las pequeñas deformaciones.

Modelos constitutivos	Tipo de análisis	Arenas	Limos		Arcillas		
			Dilatante, Baja compresibilidad	No Dilatante, Comprensible	Grado de consolidación		
					Alto Limo Arcillas	bajo	normal Arcillas blandas
Mohr- Coulomb (Drucker- Prager)	SLS						
	ULS						
CAP	SLS						
	ULS						
Cam- Clay Modificado	SLS						
	ULS						
HS- Estandar	SLS	HS- Small			HS- Estandar		
HS-Small	ULS	HS- Small			HS- Estandar		

**Tabla 2-1:** Comportamiento de modelos de acuerdo al tipo de suelo y análisis. Línea discontinua: puede usarse, pero no es recomendado en términos de calidad de resultados, Línea continua: se puede aplicar; relleno verde modelo mejor recomendado. Tomado de (Zimmermann et al., 2010).

El modelo nace de una dependencia no-lineal hiperbólica propuesta por Duncan- Chang para la relación de esfuerzo-deformación (Salas, 2018) como se expresa a continuación:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{Para: } q < q_f \quad (2.1)$$

Donde  $q_a$  es el valor de la asíntota para la resistencia del corte y  $E_i$  es el valor de la rigidez inicial, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \quad (2.2)$$



El cual  $R_f$  es la relación de falla con valores  $< 1.0$  y  $E_{50}$  es el módulo de rigidez dependiente de la tensión de confinamiento para la carga primaria, el cual se representa mediante la siguiente ecuación:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{C' \cos(\phi') - \sigma'_3 \sin(\phi')}{C' \cos(\phi') + p'_{ref} \sin(\phi')} \right)^m \quad (2.3)$$

En donde  $E_{50}^{ref}$  hace referencian al módulo de rigidez referencial correspondiente al 50% de la falla para para la presión de confinamiento referencial  $p'_{ref}$  que tiene un valor de 100 KPa y el esfuerzo principal  $\sigma'_3$  contribuye al valor de la rigidez actual. El modelo considera la elasticidad no-lineal definida por la potencia  $m$  la cual hace referencia a la dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos, el cual se puede calibrar utilizando un módulo de corte referencial  $G_{ref}$  en función de  $p'$  en donde se tiene:

$$G(p') = G_{ref} \left( \frac{p'}{p'_{ref}} \right)^m \quad (2.4)$$

El esfuerzo desviador ultimo  $q_f$  y el valor de la asíntota para la resistencia al corte  $q_a$  están definidos de la siguiente forma:

$$q_f = (C' \cot(\phi') - \sigma'_3) \frac{2 \sin(\phi')}{1 - \sin(\phi')} \quad (2.5)$$

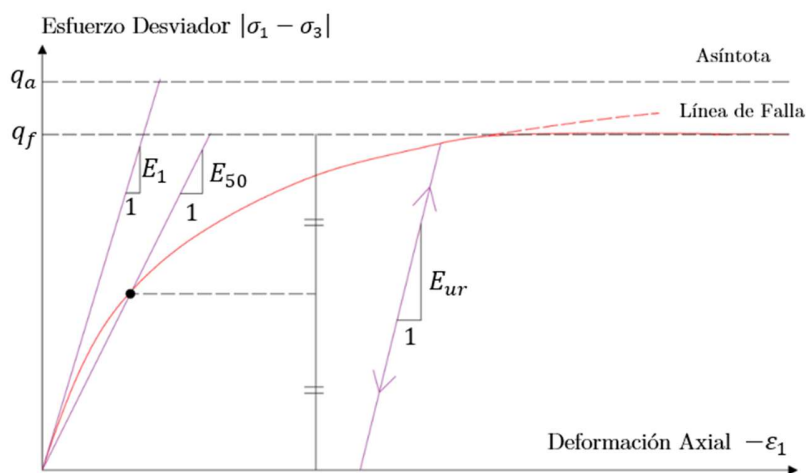
$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (2.6)$$

La relación que muestra la ecuación 2.5 viene derivada del criterio de falla por el modelo de Mohr-Coulomb, el cual tiene en cuenta los valores de la cohesión efectiva  $C'$  y el ángulo de fricción efectiva  $\phi'$ .

Para los valores de esfuerzo de descarga y recarga se da uso de otro modulo dependiente de la tensión, como se presenta a continuación:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{C' \cos(\phi') - \sigma'_3 \sin(\phi')}{C' \cos(\phi') + p'_{ref} \sin(\phi')} \right)^m \quad (2.7)$$

En donde  $E_{ur}^{ref}$  hace referencia al módulo de Young para descarga y recarga y corresponde a la presión de confinamiento referencial  $p'_{ref}$ . Esta relación hiperbólica con las ecuaciones anteriormente presentadas se puede representan mediante la figura 2-7:



**Figura 2-7:** Relación hiperbólica esfuerzo-deformación para ensayos triaxiales.  
Tomado de (Leal et al., 2009).

Por último, tenemos el módulo de endurecimiento  $E_{oed}$  que reproduce compresión isotrópica y edométrica de suelos:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{C' \cos(\phi') - \sigma'_3 / K_{0,nc} \sin(\phi')}{C' \cos(\phi') + p'_{ref} \sin(\phi')} \right)^m \quad (2.8)$$

La cual, tiene en cuenta parámetros como la rigidez edométrica de referencia, por lo cual estará en función de la presión de confinamiento referencial  $p'_{ref}$  y el coeficiente normalmente consolidado  $K_{0,nc}$ .

Por último, cuando se consideran en el modelo las pequeñas deformaciones, se conoce que el suelo está comportándose de manera elástica durante las descargas y recargas que sufra el terreno. Sin embargo, el rango de deformaciones en el que se comportan los suelos verdaderamente elásticos, es decir donde se recuperan del esfuerzo aplicado casi por completo, es muy pequeñas. Con un aumento de la amplitud de las deformación, la rigidez del suelos decae de manera no lineal; por lo tanto el HS-Small incorpora la rigidez del

suelos de deformaciones muy pequeñas y su dependencia no lineal de la amplitud de las deformaciones (Salas Fontecilla, 2018) como se ve en la figura 2-6. Por lo tanto, se deben tener en cuenta para el cálculo de estas pequeñas deformaciones otros dos parámetros: los cuales son:

- El módulo de cortante para deformaciones muy pequeñas  $G_0$ .
- El nivel de deformación de cortante en el que el módulo secante de cortante  $G_s$  se reduce alrededor del 70% de  $G_0$ :  $\gamma_{0.7}$ .

Estos parámetros son expresados a continuación mediante a la siguiente ecuación:

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + a \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|} \quad \text{Donde } a: 0.385 \quad (2.9)$$

Para este modelo las magnitudes de las deformaciones del suelo se pueden modelar a una mayor precisión, debido a que incorpora tres parámetros de rigidez de entrada diferentes, los cuales corresponden a la rigidez secante en ensayos triaxiales, rigidez tangente para carga primaria edométrica y rigidez de descarga- recarga. Por lo tanto, los parámetros se asocian a este modelo son:

Rigidez del suelo y falla		Unidad
$E_{50}^{ref}$	Rigidez secante en ensayos triaxiales.	KPa
$E_{oed}^{ref}$	Rigidez tangente para carga primaria edométrica	KPa
$E_{ur}^{ref}$	Rigidez en descarga- recarga	KPa
$G_0^{ref}$	Modulo cortante de referencia para $p'_{ref}$ en deformaciones muy pequeñas ( $\epsilon < 10^{-6}$ )	KPa
$\gamma_{0.7}$	Deformación cortante límite con $G_s = 0.7G_0$	-
$m$	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos	-

**Tabla 2-2:** Parámetros para la Rigidez del suelo.

Parámetros de Falla		Unidad
$C'$	Cohesión efectiva	KPa
$\phi'$	Ángulo de fricción efectiva	°
$\psi$	Ángulo de dilatancia	°
$\sigma_t$	Corte de tensión y resistencia a la tracción	KPa

**Tabla 2-3:** Parámetros de falla, similares al modelo Mohr- Coulomb.

Parámetros Adicional		Unidad
$v_{ur}$	Relación de Poisson en descarga-recarga	-
$R_f$	Relación de Falla	-
$K_{0\ nc}$	Coefficiente normalmente consolidado	-
$e$	Relación de vacíos	-
$\sigma_{tension}$	Resistencia a la Tracción	KPa
$\gamma'$	Peso volumétrico	KN/m <sup>3</sup>

**Tabla 2-4:** Parámetros adicionales para pequeñas deformaciones.

# Capítulo 3

## 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología usada para realizar la calibración del sistema de contención de la excavación. Se determinó como base de estudio la excavación del edificio Parque Oriente localizado en la ciudad de Chile (Salas Fontecilla, 2018). Esta fue ejecutada mediante un sistema de contención de pilotes discontinuos anclados y arriostrados lateralmente mediante anclajes.

La excavación cuenta con una profundidad de 21.2 m sobre la cota cero a nivel de terreno. En donde se registraron en campo las deformaciones en cada etapa constructiva mediante la instrumentación de inclinómetros.

El programa que se usó para realizar el estudio fue el software MIDAS GTS NX. El cual permite realizar un modelado de elementos finitos, representando cada uno de los componentes mecánicos y geométricos del perfil del suelo y la estructura de contención. Es de resaltar que el programa permite realizar el modelado en 3D, el cual fue ejecutado en el presente proyecto. De igual forma es capaz de realizar el análisis etapa por etapa de las deformaciones que se va teniendo en este perfil de suelo de acuerdo al proceso constructivo implementado.

El modelo constitutivo que mejor representa el comportamiento del suelo para este caso de estudio es el de Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS-Small) ya que permite simular el comportamiento esfuerzo-deformación de una forma no lineal hiperbólica, además de incorporar endurecimiento en trayectorias isotrópicas como de corte; ayudando a predecir de forma más realista las deformaciones inducidas.

A continuación, se hará la descripción de cada una de las propiedades mecánicas y geométricas determinadas para poder realizar la calibración del sistema de contención para la excavación mediante pilotes discontinuo anclados y arriostrados lateralmente por anclajes, con el software anteriormente enunciado. En la Figura 3-1 se representa un diagrama de flujo, el cual muestra el proceso que se llevó a cabo para lograr un modelo que represente las cualidades y comportamiento del suelo del sistema a evaluar.

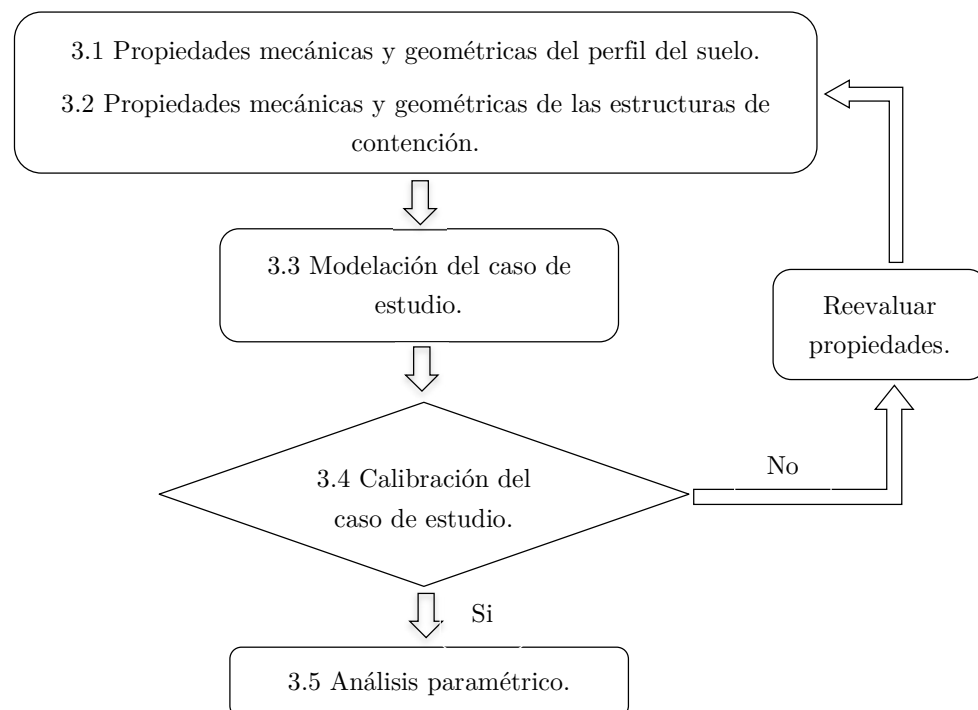


Figura 3-1: Metodología de desarrollo para esta investigación.

### 3.1 Propiedades mecánicas y geométricas del perfil del suelo

Las propiedades geotécnicas que se tienen en este perfil de suelo se suministraron a partir de los datos de laboratorio de una excavación realizada a uno 400 m de la zona actual de estudio. Resultados que se obtuvieron a partir del ensayo triaxial de Kort in situ (1979), técnica de curvas paralelas u homotéticas de Hoz (2017) y el ensayo de columna resonante y corte torsional (Salas, 2018). En donde principalmente se caracterizar un suelo de gravas areno-arcillosas bien gradada (GW—GC), con un nivel de compactación alto y con un tamaño máximo de partícula de 90 mm. Dentro de otras propiedades que lo clasifican en

este tipo de suelos es el porcentaje de finos que tienen, el cual va en un rango entre 2- 3% y con un índice de plasticidad entre 5 y 30. El nivel freático aproximadamente está a unos 50 metros de profundidad, lo cual proporciona unas condiciones óptimas para implementar este sistema de retención en la excavación (Salas, 2018). Estas propiedades se extraer de la tesis de Salas (2018).



**Figura 3-2:** Zona de la exploración geofísica y lugar de excavación en Santiago de Chile.

En base a la exploración geofísica en el río Mapocho, se distinguió que el perfil de suelo está conformado por 2 estratos o deposiciones. En donde, por medio del modelo constitutivo Hardening Soil para pequeñas deformaciones (HS- Small) se hizo la modelación para ambos estratos del terreno, debido a las condiciones geotécnicas que presenta el perfil del suelo permitiendo obtener unas deformaciones aproximadas. En los cuales tenemos los siguientes parámetros y condiciones:

- La primera deposición, tiene un espesor de estrato que se encuentra a unos 11.3 m de profundidad aproximadamente sobre la cota cero a nivel de terreno como se muestra en la Figura 3-3. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para el modelo HS- Small son:

Parámetro	Unidad	Valor para la primera deposición
$E_{50}^{ref}$	KPa	80000
$E_{oed}^{ref}$	KPa	130000
$E_{ur}^{ref}$	KPa	350000
$G_0^{ref}$	KPa	400000
$\gamma_{0.7}$	-	0.008
$m$	-	0.55

**Tabla 3-1:** Parámetros para la Rigidez de la primera deposición, HS- Small.

Parámetro	Unidad	Valor para la primera deposición
$C'$	KPa	15
$\phi'$	°	45
$\psi$	°	10

**Tabla 3-2:** Parámetros de falla de la primera deposición, HS- Small.

Parámetro	Unidad	Valor para la primera deposición
$v_{ur}$	-	0.3
$R_f$	-	0.9
$K_{0nc}$	-	0.5
$e$	-	0.15
$p'_{ref}$	KPa	100
$\gamma'$	KN/m <sup>3</sup>	22

**Tabla 3-3:** Parámetros adicionales de la primera deposición, HS-Small.

- La segunda deposición, tiene un espesor de aproximadamente de  $\leq 40$  metros de profundidad sobre la cota cero del terreno. Sin embargo, para este análisis debido a que el nivel freático se encuentra a una profundidad considerable y no perjudica los niveles de excavación, se adopta por este motivo un nivel de estrato con espesor 68.7 metros, que va hasta una profundidad de 80 metros sobre la cota cero del terreno sin representación del nivel freático en el modelo, como se muestra en la figura 3-3. En donde se adopta los siguientes parámetros para ser representados por el modelo HS-Small:

Parámetro	Unidad	Valor para la segunda deposición
$E_{50}^{ref}$	KPa	275000
$E_{oed}^{ref}$	KPa	190000
$E_{ur}^{ref}$	KPa	900000
$G_0^{ref}$	KPa	750000
$\gamma_{0.7}$	-	0.0011
$m$	-	0.51

**Tabla 3-4:** Parámetros para la rigidez de la segunda deposición, HS-Small.



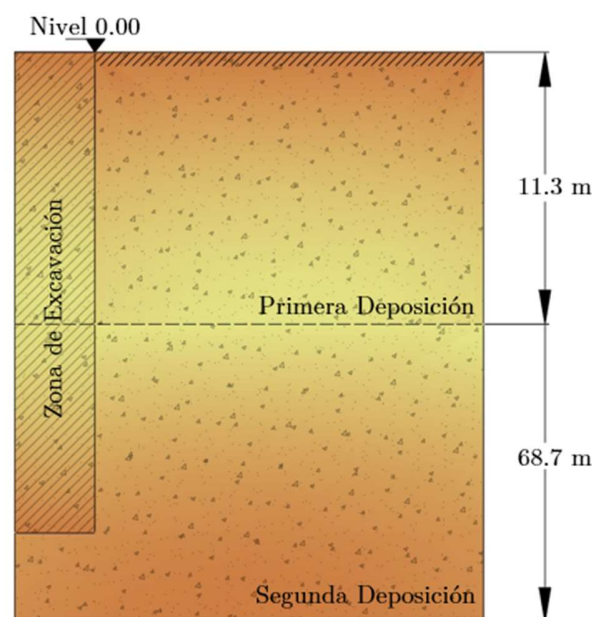
Parámetro	Unidad	Valor para la segunda deposición
$C'$	KPa	35
$\phi'$	°	45
$\psi$	°	15

**Tabla 3-5:** Parámetros de falla de la segunda deposición, HS- Small.

Parámetro	Unidad	Valor para la segunda deposición
$v_{ur}$	-	0.2
$R_f$	-	0.9
$K_{0\ nc}$	-	0.43
$e$	-	0.15
$p'_{ref}$	KPa	100
$\gamma'$	KN/m <sup>3</sup>	22.5

**Tabla 3-6:** Parámetros adicionales de la segunda deposición, HS-Small.

A continuación, se muestra una representación de la geométrica que tiene el perfil de suelo como se describió anteriormente. Teniendo en cuenta que existe una zona de excavación la cual será intervenida mediante el sistema de contención de pilotes anclados. En total la zona de profundidad del suelo a analizar es de 80 metros.

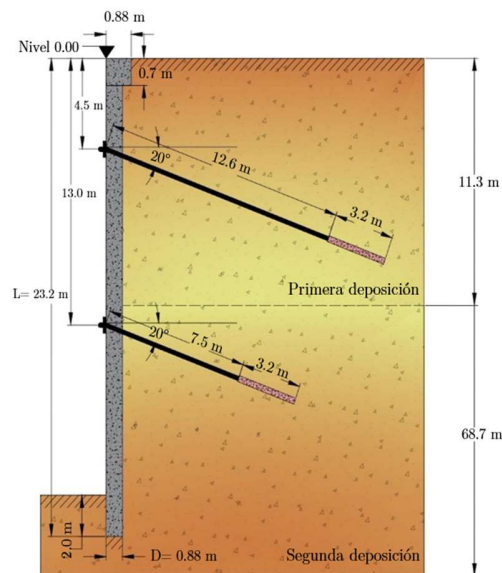


**Figura 3-3:** Esquema geométrico del perfil de suelo.

### 3.2 Propiedades mecánicas y geométricas de la estructura de contención

Los elementos que se usaron para representar la estructura de contención son pilotes, anclajes y una viga cabezal, en donde este sistema en conjunto se conoce como pilotes anclados discontinuos arriostrados lateralmente mediante anclajes. Cada uno de ellos tiene propiedades mecánicas y geométricas diferentes, pues se debe tener en cuenta las condiciones del terreno en el cual se va a aplicar la estructura (Estas condiciones se mencionaron anteriormente en el numeral 3.1).

Cada elemento del sistema de contención se representó principalmente mediante un modelo elástico lineal; ya que considera propiedades como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el peso específico para condiciones en las cuales se vaya a representar cada uno de los elementos. El sistema de pilotes discontinuo anclados se encuentra representado en la figura 3-4, en donde encontramos un esquema de la geometría y posicionamiento de cada uno de los elementos de la estructura de contención, datos que son extraídos de la tesis de Salas (2018) y serán descritos a continuación:



**Figura 3-4:** Esquema geométrico y posicionamiento del sistema de contención mediante pilotes anclados discontinuos arriostrados lateralmente por anclajes.

### 3.2.1 Sistema de pilotes

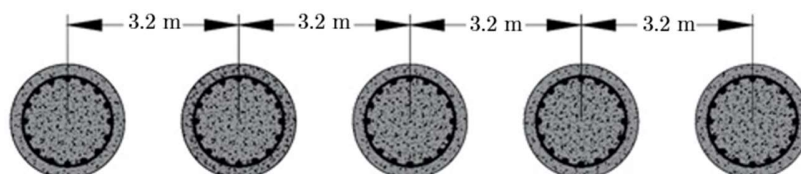
Para los pilotes, las propiedades mecánicas se representaron mediante un modelo elástico lineal, como se había mencionado anteriormente. Pues se tuvo en cuenta el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el peso específico del concreto estructural. Por otro lado, tenemos las propiedades mecánicas relacionando su longitud, diámetro y separación (su distancia se toma de eje a eje de cada pilote como se muestra en la figura 3-5. En donde como resultado se consideraron los siguientes parámetros:

Parámetro	Unidad	Pilote
$E$	MPa	30000
$\nu$	-	0.2
$\gamma$	KN/m <sup>3</sup>	24

**Tabla 3-7:** Propiedades mecánicas de los pilotes.

Parámetro	Unidad	Pilote
$D$	m	0.88
$L$	m	23.2
$s$	m	3.2

**Tabla 3-8:** Propiedades geométricas de los pilotes.



**Figura 3-5:** Vista en planta de la separación ( $s$ ) de los pilotes para el caso de estudio.

### 3.2.2 Sistema de anclajes

El sistema de anclajes que se usó para este caso de estudio fue de tipo activos o postensados. Es decir, que estos elementos trabajan por dos medios de tensado; una tensión inicial con una carga menor al que está condicionado el sistema y la tensión final en el cual se va a someter los anclajes.

Para los valores de las tensiones, se tuvo en cuenta que el sistema está conformado por dos líneas de anclajes; la primera línea se encuentra a una profundidad de 4.5 m sobre el nivel cero del terreno con una tensión inicial de 550 KN y una tensión final de 880 KN, para la segunda línea de anclajes que se encuentra a una profundidad de 13.0 m la tensión inicial de 350 KN y una final de 1245 KN como se muestra en la tabla 3-9 (las profundidades de las líneas de cada sistema de anclaje están representados en la figura 3-4).

Anclajes	Tensión inicial (KN)	Tensión final (KN)
1° Línea de Anclaje	550	880
2° Línea de Anclaje	350	1245

**Tabla 3-9:** Valores de tensiones.

En base a la figura 2-4, el sistema cumple con ciertas características de acuerdo a las condiciones de terreno en el que se presente, pues su sistema de funcionamiento esta dividido, por longitud libre y bulbo; en donde estas afectan las propiedades geométricas y mecánicas de cada uno de estos elementos. A continuación, se muestran cada uno de los parámetros que se tuvo en cuenta para el sistema de anclajes en base a las condiciones del modelo elástico que se había enunciado anteriormente, en donde tenemos:

Elemento	Longitud Libre			Bulbo		
	Parámetro	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
1° y 2° Línea de Anclaje	$E$	MPa	191000	$E$	MPa	2500
	$\nu$	-	0.27	$\nu$	-	0.3
	$\gamma$	KN/m <sup>3</sup>	78	$\gamma$	KN/m <sup>3</sup>	21

**Tabla 3-10:** Propiedades mecánicas de los anclajes.

Elemento	Longitud Libre		
	Parámetro	Unidad	Valor
1° Línea de Anclaje	$D$	m	0.0327
	$l$	m	12.6
	$\beta$	°	20
	$s$	m	3.2
	$z$	m	4.5
2° Línea de Anclaje	$D$	m	0.0383
	$l$	m	7.5
	$\beta$	°	20
	$s$	m	3.2
	$z$	m	13

**Tabla 3-11:** Propiedades geométricas para la longitud libre de los anclajes.

Bulbo		
Parámetro	Unidad	Valor
$D$	m	0.15
$l$ 1° Línea de Anclaje	m	3.2
$l$ 2° Línea de Anclaje	m	5
$\beta$	°	20
$s$	m	3.2

**Tabla 3-12:** Propiedades geométricas para el bulbo de los anclajes.

### 3.2.3 Viga Cabezal

La viga cabezal es un elemento que tiene como función distribuir las cargas, evitar el punzonamiento del pilote y como una medida de mitigación para el improbable caso de que un anclaje pierda carga (Keller, 2019). Para este sistema se consideró una viga cabezal bajo el mismo modelo elástico mencionado anteriormente y con dimensiones rectangulares. En donde para las propiedades mecánicas se definen con los mismos parámetros tomados en la tabla 3-7 la cual hace referencia a los valores para el sistema de pilotes y la geometría para el sistema es:

Parámetro	Unidad	Pilote
$H$	m	0.7
$B$	m	0.88

Tabla 3-13: Propiedades geométricas para la viga cabezal.

### 3.3 Modelación del caso de estudio

Para la modelación numérica se empleó el software MIDAS GTS NX en donde se representó los elementos del suelo y la estructura de contención mediante un modelo tridimensional (3D). Este programa nos permite realizar un análisis de las deformaciones etapa por etapa y poder representar las propiedades mecánicas y geométricas del suelo y del sistema de contención a evaluar.

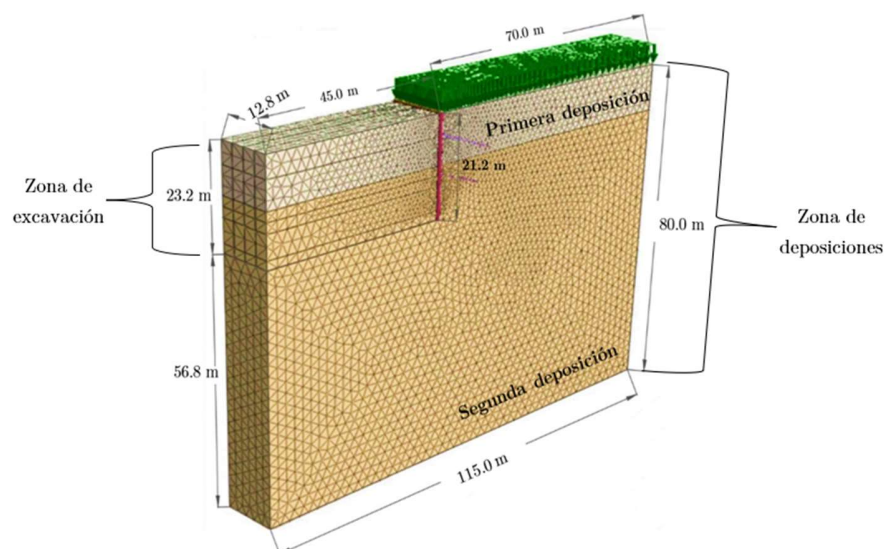


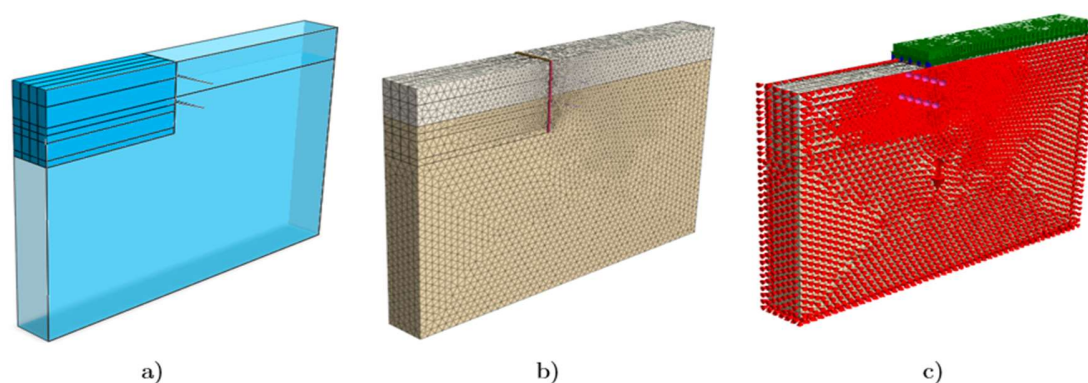
Figura 3-6: Modelación del caso de estudio mediante el software MIDAS GTS NX.

A partir de las propiedades anteriormente mencionadas, se realizará la descripción de cada uno de los elementos usados para poder ilustrar el caso de estudio en el presente software y llegar a las condiciones que se muestran en la figura 3-6, el cual muestra un esquema geométrico del modelo que se adoptó para nuestro estudio y poder lograr representar lo más similar posible las condiciones tomadas y registradas en campo.

Las unidades principales del Software MIDAS GTS NX que se van a manejar para este caso de estudio son KN, m, J, sec y una aceleración de la gravedad ( $g$ ) con un valor de

9.80665 m/seg<sup>2</sup>. Estas propiedades tienen el objetivo inicial de definir el campo de trabajo en cual se desarrollará el modelo.

A continuación, se presenta una descripción de la modelación que se adoptó y cada una de las condiciones, propiedades y etapas usadas para poder representar las condiciones del suelo y del sistema de contención. La figura 3-7 representa el sistema de trabajo para el software MIDAS GTS NX, el cual parte desde su geometría (a) hasta las condiciones de frontera (c) usadas para poder correr y determinar las deformaciones del modelo.

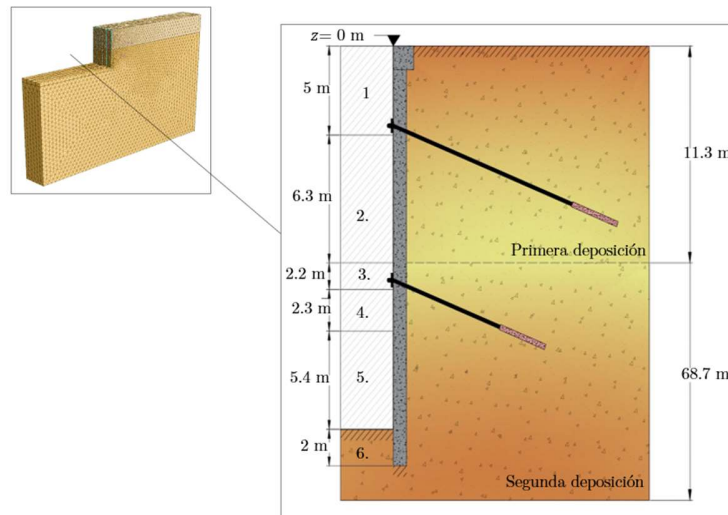


**Figura 3-7:** a) Modelado geométrico, b) Modelado del sistema con su enmallado y c) Modelado con sus condiciones de frontera.

Para ejecutar la modelación en el software MIDAS GTS NX, la interface que inicialmente adopta el programa para realizar su geometría es partir de un modelado bidimensional (2D). En donde, por medio de líneas y rectángulos se define un plano de trabajo 2D la zona de excavación, deposiciones y sistema de contención. Estos elementos pasan a un plano de trabajo tridimensional (3D) a través de la generación de sólidos, como se muestra en la figura 3-7 a). Para el presente caso de estudio, las dimensiones que se adoptaron en el suelo (zona de excavación y zona de deposiciones), son las que están representadas en la figura 3-3 y 3-6.

Es de resaltar que la zona de excavación está conformada por diversos sólidos a diferentes profundidades de acuerdo a los niveles y etapas que se adoptaron en el proceso constructivo para el uso de los pilotes discontinuos como se muestra en la figura 3-8. Para el sistema de contención sus propiedades geométricas están definidas en la tabla 3-8 y 3-11 a la 3-13 (para pilotes, anclajes y viga cabezal). Este mecanismo está representado por 5 pilotes consecutivos a una distancia de 3.2 m de eje a eje como se muestra en la figura

3-5, en donde cada uno de ellos están conformados por dos líneas anclajes y están unidos en su parte superior por una viga cabezal. Realizada la distribución general de sólidos y líneas se dará por terminado nuestro modelado geométrico.



**Figura 3-8:** Dimensiones de profundidades y etapa de cada excavación.

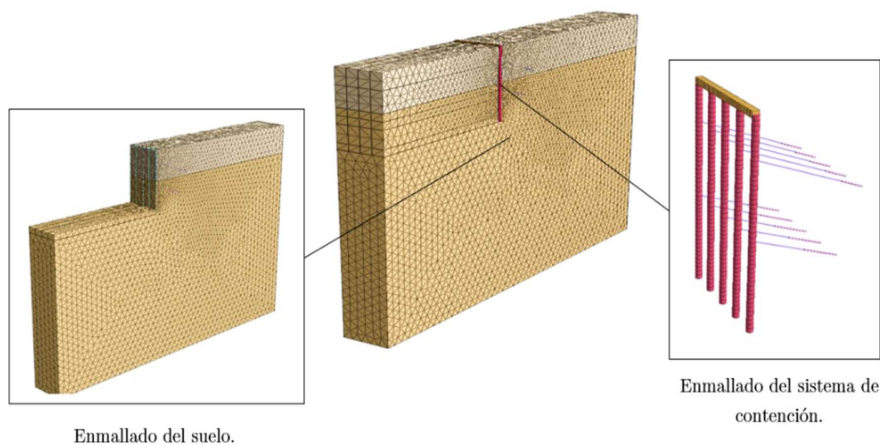
Numeración basada en la figura 3-7.	Nombre de la malla	Propiedad de la Malla
1	Excavación 1	Primera Deposición
2	Excavación 2	
3	Excavación 2 <sup>a</sup>	Segunda deposición
4	Excavación 3	
5	Excavación 3 <sup>a</sup>	

**Tabla 3-14:** Nomenclatura usada para las mallas de la zona de excavación.

Posterior a ello se definen cada uno de los materiales y propiedades que van a conformar nuestro caso de estudio para generar un enmallado óptimo y representativo del terreno y sistema de contención. El cual nos va a permitir extraer resultados más acertados y similares a los registrados en campo.



Para el suelo, contamos con dos deposiciones (primera y segunda deposición, como se muestra en la figura 3-8); estas se definieron como un material isotrópico a partir del modelo Hardening Soil – (Small strain stiffness), el cual permite que el suelo tenga un comportamiento elastoplástico y poder calcular de forma más precisa las deformaciones generadas en nuestro caso de estudio, a partir de los datos que muestran en la tabla 3-1 a la 3-6. Por otro lado, las propiedades de enmallado que se usaron para las dos deposiciones fueron de tipo 3D de carácter Solid que nos permiten dar uso en suelos bajo estas condiciones geométricas con volumen; tanto para las deposiciones como para la zona de excavación que cuenta con las mismas características el terreno. El enmallado de la zona de excavación cuenta con las propiedades que se ilustran en la tabla 3-14.



**Figura 3-9:** Enmallado general del caso de estudio.

Para el sistema de contención encontramos los pilotes, anclajes (longitud libre y bulbo) y viga cabezal los cuales fueron definidos como materiales isotrópicos bajo un modelo elástico para estructuras. Para sus propiedades de enmallado contamos con los pilotes y la viga cabezal como elementos tipo Beam 1D (trabajando como elementos que restringe las rotaciones en nodos), para la longitud libre de la primera y segunda línea de anclajes se considera un tipo Emabedded Truss 1D (son elementos de interfaz que no requieren conexiones de nodo con elementos de tierra vecinos, pueden establecer tamaños de malla independientes.), en ellos se puede registrar valores de tensiones, en el bulbo se consideró para ambas líneas de anclajes como un elemento Emabedded Beam 1D ( el cual tiene el mismo grado de libertad que un elemento Beam, pero uno de los nodos del elemento no puede sobresalir del elemento madre ya que hace conexión automáticamente).

En el modelo se realizó un control de enmallado, con el objetivo de generar en él una cantidad de nodos representativos, que nos puedan suministrar la información necesaria. Para los elementos del bulbo se usó un sembrado de nodos con un tamaño de 0.5 m, las longitudes libres tienen un tamaño de enmallado con una división de 1, ya que divide la línea seleccionada en varias divisiones, para la zona del pilote y la viga cabezal se cuenta con un control de enmallado con un tamaño de 0.5 m. Para el enmallado del suelo se hizo un control gradual respecto a las fronteras laterales en los bordes horizontales con un valor inicial de 0.5 m a 2.5 metros, tomando como zona de inicio el lugar donde se posicionan los pilotes, generando en el sólido una malla de tipo tetraédrico con un tamaño general de 2.5 metros a partir del control de malla, como se representa en figura 3-9. El sistema de enmallado se da por terminado cuando se cumplan todos los criterios anteriormente mencionados como se muestra en figura 3-7 b).

Uno de los aspectos que se debe considerar a continuación son las condiciones de frontera a las cuales se va someter nuestro modelo. Para este caso de estudio se realizará un análisis estático. Por ende, se debe restringir los desplazamientos horizontales en los bordes laterales y desplazamientos verticales y horizontales en el borde inferior del modelo. Esta restricción se representa con flechas de color rojo alrededor del campo de trabajo como se muestra en la figura 3-7 c). Adicional a ellos, en los pilotes se deben considerar también una restricción al ser un modelo en 3D, esta se debe efectuar en el campo de rotación del eje z ( $R_z$ ).

Otra condición es el peso propio de los materiales, es decir en qué dirección está actuando la gravedad. Para el caso de estudio, considerando que nuestro campo de trabajo está representado en un modelo 3D, esta dirección se asume en el eje z ( $G_z = -1$ ).

La sobrecarga que va a someter la estabilidad de nuestro modelo tiene un valor de 12 KN/m<sup>2</sup>. Mediante un tipo 3D Element Face, nos permite seleccionar las caras de los nodos superiores en la zona de la primera deposición, como se representa con flechas de color verde en la figura 3-7 c).

Este modelo cuenta con un sistema de anclajes activos. Por lo tanto, el sistema de mallas usadas para las longitudes libres (tipo Embedded Truss) nos permite ingresar los

diferentes valores de las tensiones por medio de Prestress. Las cuales se definen en la tabla 3-9 para las diferentes etapas por las cuales pasa la excavación.

Luego de generar todas las mallas y condiciones estáticas para el caso estudio; se procede a definir el proceso constructivo etapa por etapa a la cual se va a someter nuestra excavación. El tipo de análisis que se empleó en este caso es Stress-Nonlinear Time History considerado como un análisis de esfuerzo de tiempo historia no lineal. A continuación, por medio de la tabla 3-15 se realiza la descripción de cada una de las etapas consideradas para modelar nuestro caso de estudio; haciendo referencia a las mallas, condiciones estáticas y valores usados para poder representar el comportamiento que sufre el suelo hasta llegar a la etapa final de la excavación.

Etapa	Nombre	Profundidad de excavación (z)	Descripción de la etapa
1	Condición Inicial	0 m	Se activan todas las mallas que representan la excavación y las deposiciones, sus restricciones de condiciones de frontera y el paso propio general del caso de estudio.
2	Sobrecarga	0 m	Se activa el valor de la sobrecargar.
3	Pilotes	0 m	Se activa la malla de los pilotes junto con su restricción de rotación en el eje z (Rz).
4	Excavación 1	-5 m	Desactivo la malla denominada "Excavación 1" (tabla 3-14).
5	Anclaje 1	-4.5 m	Se activa la malla usada para la primera línea de anclajes, con su respectivo valor de tensión inicial (tabla 3-9).
6	Excavación 2	-13.5 m	Se desactiva las mallas denominadas "Excavación 2" y "Excavación 2 <sup>a</sup> " (tabla 3-14). De igual forma se desactiva la tensión inicial y se activa la tensión final de la primera línea de anclajes (tabla 3-9).
7	Anclaje 2	-13 m	Se activa la malla usada para la segunda línea de anclajes, con su respectivo valor de tensión inicial (tabla 3-9).
8	Excavación 3	-21.2 m	Se desactiva las mallas denominadas "Excavación 3" y "Excavación 3 <sup>a</sup> " (tabla 3-14). De igual forma se desactiva la tensión inicial y se activa la tensión final de la segunda línea de anclajes (tabla 3-9).

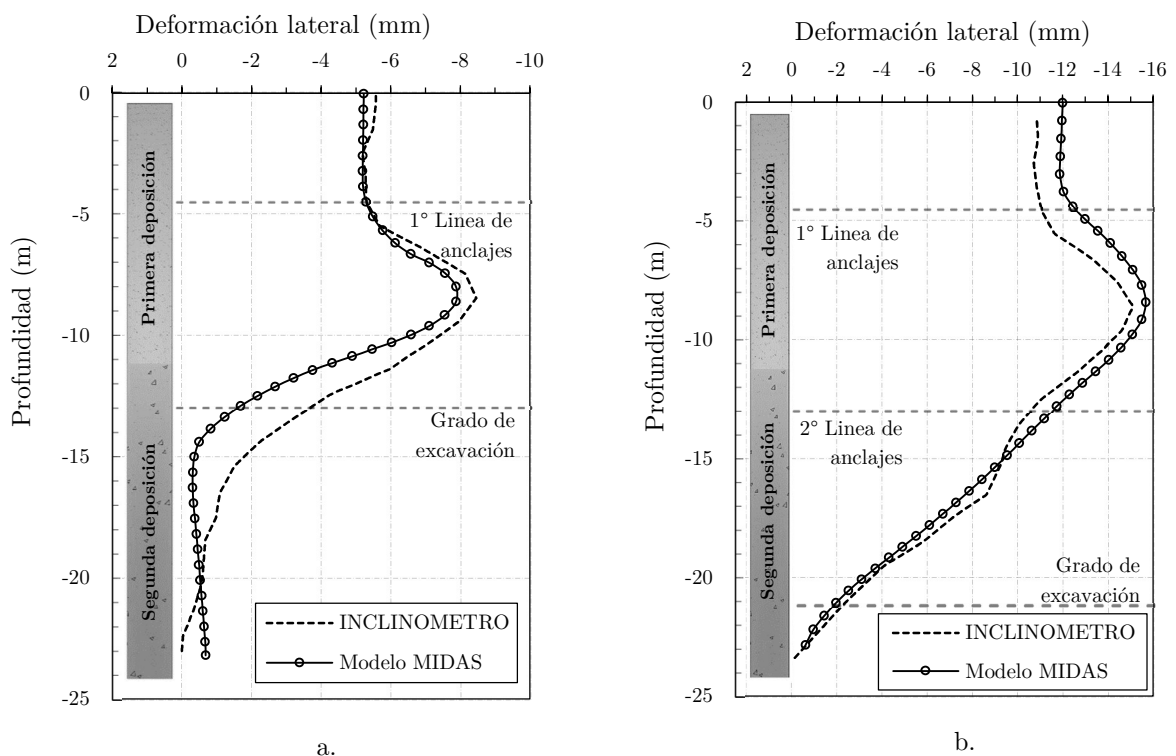
**Tabla 3-15:** Sistema constructivo implementado para el caso de estudio.

Por último, luego de haber definido el sistema constructivo, se selecciona el tipo de caso de análisis que se va a emplear. Para este caso, es de tipo Construction Stage el cual hace referencia a un análisis por etapas constructivas. Para manejar un control antes de ejecutar la solución del caso de estudio, se considera las condiciones de  $K_0$ , al igual que el comando que permite que el resultado de los nodos no se encime el uno con el otro y por

defecto cuando existe un caso de convergencia, que es común para un sistema en 3D el modelo se detiene cuando encuentra una falla, por lo tanto, se debe seleccionar esta opción y el análisis se realiza continuamente incluso cuando los valores no convergen.

Se finaliza corriendo el modelo con la opción Solve el cual empieza a realizar un análisis etapa por etapa. Por lo general, el tiempo varío de acuerdo al rendimiento que tenga de equipo y oscila entre unas 10 a 12 horas de acuerdo a las condiciones de mallas anteriormente expuestas.

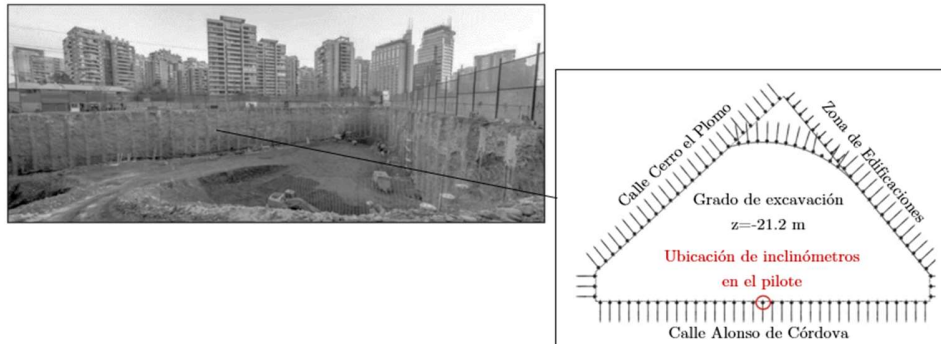
### 3.4 Calibración del caso de estudio



**Figura 3-10:** Deformaciones registradas para la etapa a. de la excavación 2 y b. de la excavación 3 de acuerdo a la tabla 3-15.

Para la calibración del caso de estudio se consideraron las deformaciones registradas en campo en el proyecto Parque Oriente localizado en la ciudad de Chile, en donde se ubicó la instrumentalización de los inclinómetros en el pilote como se muestra en la figura 3-11;

estos datos en encuentran suministrados en la tesis del ingeniero Felipe Salas (Salas Fontecilla, 2018).



**Figura 3-11:** Ubicación de la instrumentalización de los inclinómetros para el registro de las deformaciones.

Estos datos de campo se encuentran denotados por el nombre de “INCLINOMETROS” en la figura 3-9 a. y b. En donde se garantizó que el registro en campo fuera similares al modelo numérico para las etapas de la excavación 2 y 3 de acuerdo a la tabla 3-15. Los datos del modelo están denotados por el nombre de “Modelo MIDAS” en la figura 3-9 a. y b. Estas deformaciones del modelo numérico se suministraron a partir del pilote intermedio realizado para el caso de estudio, el cual se había expresado que el sistema de contención estaba conformado por 5 pilotes con una separación entre ellos de 3.2 m.

### 3.5 Análisis paramétrico

En la presente investigación se quiere determinar la influencia que tienen los parámetros geométricos en el sistema de contención. En consecuencia, se va a evaluar cómo influyen principalmente las deformaciones cuando se cuenta con una viga cabezal y sin este elemento, en nuestro sistema de pilotes anclados y arriostrados lateralmente mediante anclajes, tomando como referencia nuestro caso de estudio calibrado. En conjunto, se varían igualmente en ellos los siguientes parámetros:

#### 3.5.1 Sobrecarga

Para nuestras condiciones de sobrecarga en el modelo calibrado se maneja un valor de 12 KN/m<sup>2</sup> y este sistema cuenta con una viga cabezal. Por ende, se propone hacer las

siguientes variaciones aumentando y disminuyendo los valores de la sobrecarga y determinar la influencia que tiene el sistema con y sin viga cabezal, tomando como referencia la del modelo calibrado, como se muestra en la siguiente tabla:

Caso	Sobrecarga (KN/m <sup>2</sup> ) con viga cabezal	Caso	Sobrecarga (KN/m <sup>2</sup> ) sin viga cabezal
C1	6	C9	6
C2	8	C10	8
C3	10	C11	10
C4 (Modelo calibrado)	12	C12	12
C5	22	C13	22
C6	44	C14	44
C7	66	C15	66
C8	88	C16	88

**Tabla 3-16:** Casos de análisis evaluando la sobrecarga.

### 3.5.2 Inclinación de Anclajes

En la condición de inclinación de anclajes se varía el ángulo, en donde inicialmente el sistema calibrado cuenta con un valor de 20°, contando con una viga cabezal. Para este análisis, se varió el posicionamiento de la longitud libre y el bulbo, tomando inclinaciones mayores y menor, con y sin viga cabezal; contando como referencia el modelo calibrado, en donde se plantearon los siguientes casos:

Caso	Inclinación del Anclaje (°) con viga cabezal	Caso	Inclinación del Anclaje (°) sin viga cabezal
C17	0	C23	0
C18	10	C24	10
C19 (Modelo calibrado)	20	C25	20
C20	30	C26	30
C21	40	C27	40
C22	50	C28	50

**Tabla 3-17:** Casos de análisis evaluando la inclinación de anclajes.

### 3.5.3 Diámetros

Con base en los diámetros, al elemento del sistema de contención al cual hace referencia este parámetro es al de los pilotes. Al ser elementos que proporcionar resistencia, se asume que deben tener un gran impacto cuando se varía su geometría. En el modelo calibrado contamos con unos pilotes de diámetro de 0.88 m con una viga cabezal. Por lo tanto, se varía el sistema con y sin viga cabezal para las siguientes dimensiones del pilote de diámetro:

Caso	Diámetros (m) con viga cabezal	Caso	Diámetros (m) sin viga cabezal
C29	0.6	C36	0.6
C30	0.7	C37	0.7
C31	0.8	C38	0.8
C32 (Modelo calibrado)	0.88	C39	0.88
C33	1.1	C40	1.1
C34	1.2	C41	1.2
C35	1.3	C42	1.3

**Tabla 3-18:** Casos de análisis evaluando los diámetros.

### 3.5.4 Longitud y módulo de elasticidad (E)

Se consideraron las longitudes de los pilotes, disminuyendo y aumentando los niveles de empotramiento al suelo con una variación de 2 m cada uno. De igual forma, se consideró una variación en los módulos de elasticidad, ya que estos dos elementos pueden proporcionar significativamente un aumento o disminución de las deformaciones registradas para los sistemas con y sin viga cabezal a partir del modelo calibrado anteriormente realizado, el cual contaba como base una longitud de 23.2 m y un módulo de elasticidad de 30 GPa para el sistema de pilotes. De acuerdo a ellos, se consideran los siguientes casos:

Caso	Longitudes (m) con viga cabezal	Caso	Longitudes (m) sin viga cabezal	Módulo de elasticidad (MPa)
C43	21.2	C49	21.2	20
C44	23.2	C50	23.2	
C45	25.2	C51	25.2	
C46	27.2	C52	27.2	
C47	29.2	C53	29.2	
C48	31.2	C54	31.2	
C55	21.2	C61	21.2	30
C56 (Modelo calibrado)	23.2	C62	23.2	
C57	25.2	C62	25.2	
C58	27.2	C64	27.2	
C59	29.2	C65	29.2	
C60	31.2	C66	31.2	
C67	21.2	C73	21.2	90
C68	23.2	C74	23.2	
C69	25.2	C75	25.2	
C70	27.2	C76	27.2	
C71	29.2	C77	29.2	
C72	31.2	C78	31.2	
C79	21.2	C85	21.2	150
C80	23.2	C86	23.2	
C81	25.2	C87	25.2	
C82	27.2	C88	27.2	
C83	29.2	C89	29.2	
C84	31.2	C90	31.2	
C91	21.2	C97	21.2	210
C92	23.2	C98	23.2	
C93	25.2	C99	25.2	
C94	27.2	C100	27.2	
C95	29.2	C101	29.2	
C96	31.2	C102	31.2	

**Tabla 3-19:** Caso de análisis evaluando las longitudes de pilotes y su módulo de elasticidad.

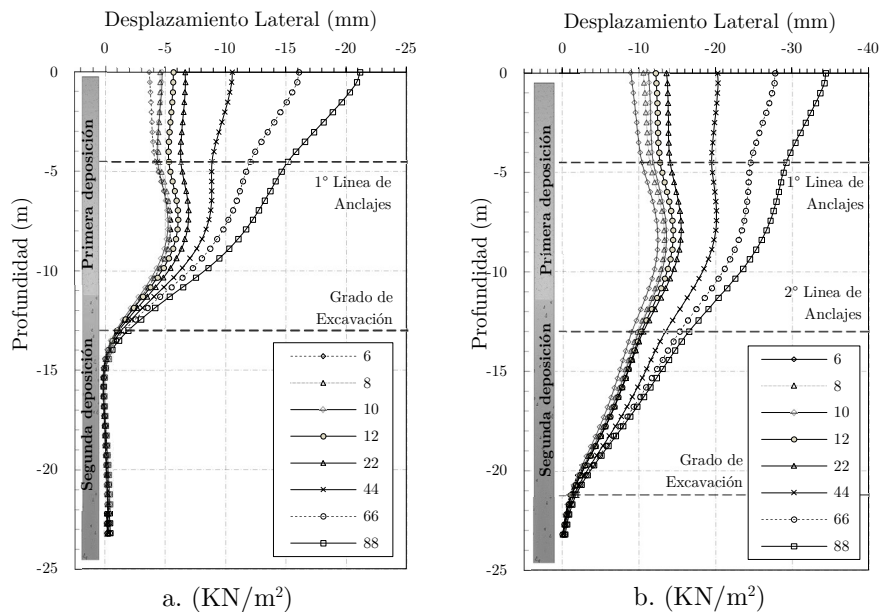


# Capítulo 4

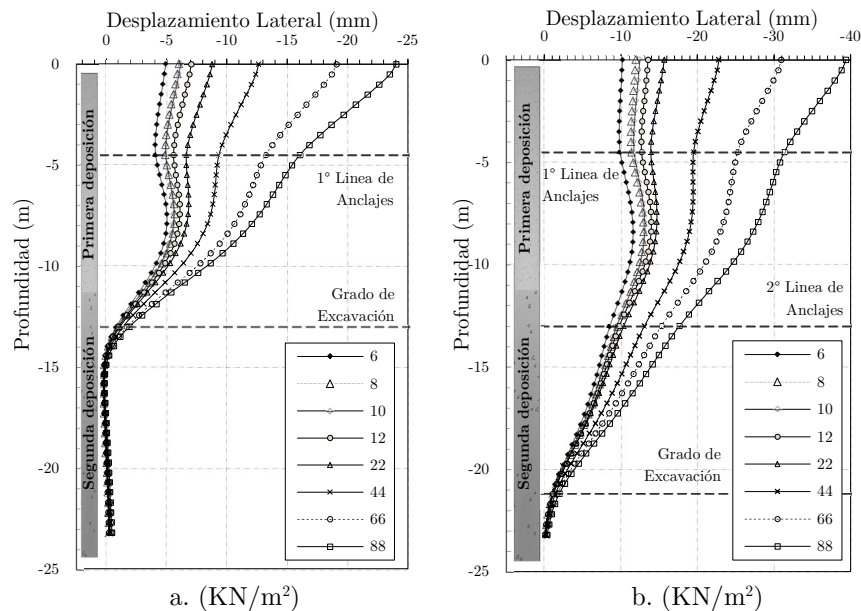
## 4. Análisis de resultados

De acuerdo a la calibración del modelo y el análisis paramétrico estipulados en el capítulo anterior. Mediante el software MIDAS GTS NX se realizan cada una de las variaciones para los casos estipulados, en donde se tuvo de referencia el caso de estudio como base experimental y poder realizar los cambios paramétricos para cada uno de los sistemas de contención. En donde se tuvieron los siguientes resultados:

### 4.1.1 Sobrecarga



**Figura 4-1:** Sobrecarga con viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.



**Figura 4-2:** Sobrecarga sin viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.

La sobrecarga representa un parámetro con unos niveles de afectación bastante altos referentes a las deformaciones registradas en el terreno. Para la figura 4.1 a. y b. se registra que entre estas dos etapas de excavación las mayores deformaciones se dan a una profundidad de -5 a -10 m para los casos de sobrecarga entre 6 a 22  $\text{KN/m}^2$ , a diferencia de los casos para 44 a 88  $\text{KN/m}^2$ , donde sus mayores deformaciones se dan en la cota a nivel del terreno. En la figura 4.2 a. y b. sucede todo lo contrario, en donde se puede apreciar para todos casos de sobrecarga que las mayores deformaciones se registran la cota cero a nivel de terreno. Por lo tanto, se puede evidenciar que la viga cabezal tiene una mayor influencia en las deformaciones en el tope de la excavación. Debido a que, a lo largo del cuerpo del pilote, siendo más exactos a partir en la 1° instalación de línea de anclajes, tanto para la excavación 2 y para excavación 3, se ve registra una leve similitud en las deformaciones con una diferencia milimétrica en decimales.

Al momento de variar la sobrecarga, para ambos sistemas con y sin viga cabezal y tomando como referencia nuestra etapa de excavación 3. Se puede observar que para los valores de 6 a 12  $\text{KN/m}^2$  con un incremento de 2  $\text{KN/m}^2$  entre cada uno de ellos, la diferencia de deformaciones máximas entre ambos sistemas es 2 mm aproximadamente, a

diferencia de los valores para sobrecarga de 22 a 88 KN/m<sup>2</sup> en donde el incremento entre ellos es de 22 KN/m<sup>2</sup> y sus deformaciones entre ambos sistemas varia máximo en unos 5 mm aproximadamente. Como se muestra en la figura 4-3, donde se tomaron las deformaciones en el tope de la excavación para cada uno de los casos, en la cota cero del terreno, basados en los datos la figura 4-1 b. y 4-2 b; por lo tanto, se tiene el siguiente grafico:

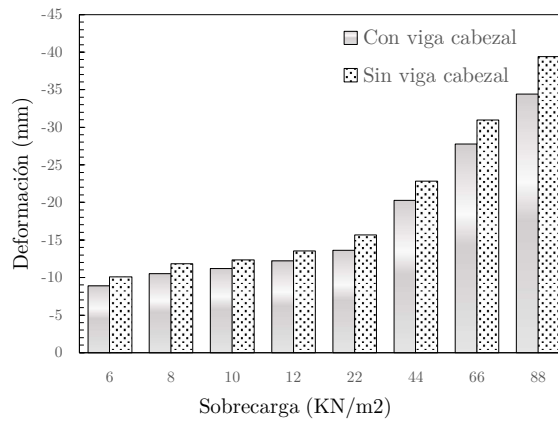


Figura 4-3: Sobrecarga con y sin viga cabezal de las deformaciones en el tope para la excavación 3.

### 4.1.2 Inclinación de anclajes

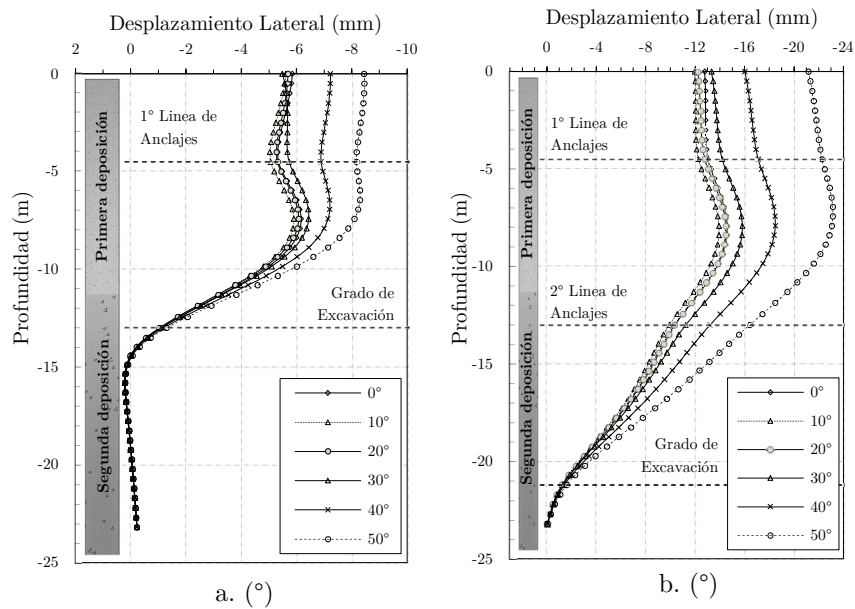
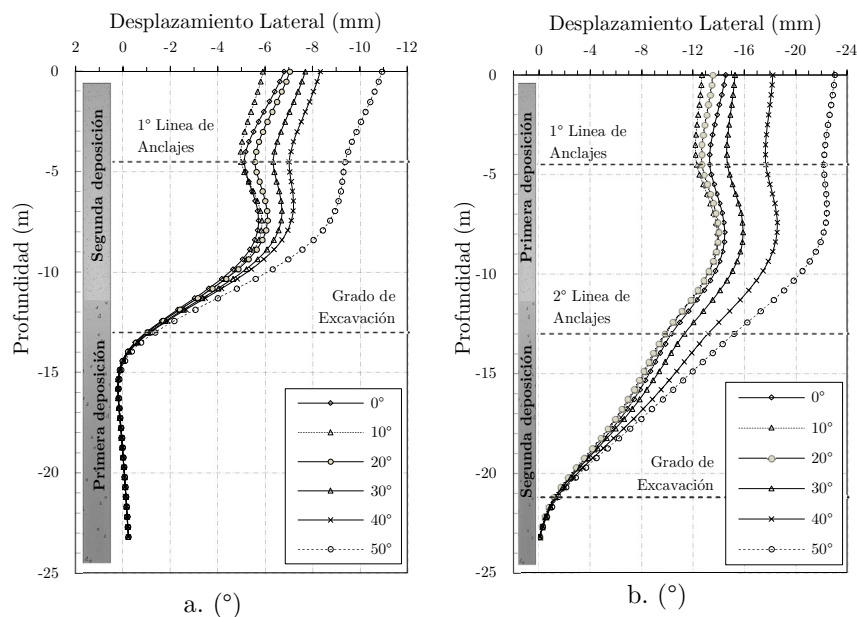


Figura 4-4: Inclinación de anclajes con viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.



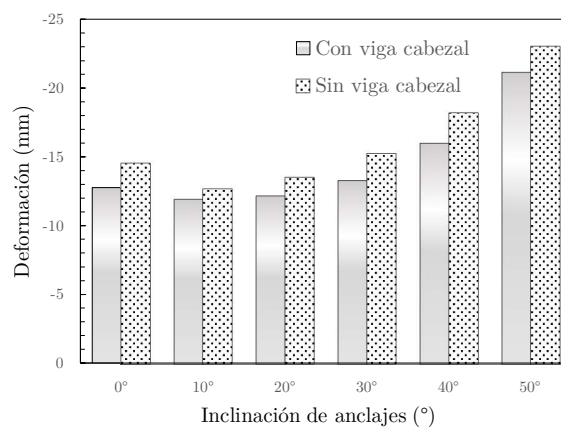
**Figura 4-5:** Inclinación de anclajes sin viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.

Para un sistema de viga cabezal como se muestra en la figura 4-4 para a. las deformaciones se comportan entre un rango de -5 mm a -6 mm y para b. en los rangos entre -12 mm a -14 mm para los casos con inclinaciones entre los 0° a los 30°. Diferente de los casos entre los 40° y 50°, en donde las deformaciones registradas presentan un aumento gradual bastante alto.

Por otro lado, se tiene el sistema sin viga cabezal en donde en la figura 4-5 para a. el rango de deformaciones es más amplio registrando datos entre los -5.5 mm a -8.5mm para la inclinación entre 0° a 40° y presentando una deformación mucho mayor para el caso de los 50°. En el caso b. de la misma figura se evidencia que estas deformaciones aumentan bastante para los grados de inclinación entre 40° y 50°.

La influencia que tiene la viga cabezal en el sistema de contención es muy alta para las deformaciones en el tope de la excavación que tiene el suelo hasta llegar a la 1° línea de anclajes. Debido a que después de esta zona, entre los dos sistemas (Con y sin viga cabezal) se va generar un cuerpo de deformaciones bastante similar hasta llegar a la profundidad máxima del pilote, como se muestra en la figura 4-4 b. y 4-5 b. Por ende, cuando se consideran valores muy grandes o igualmente en donde no se tiene ningún grado de

inclinación, como se representa en la figura 4-4 y 4-5 para ambas etapas; contando con un valor de inclinación  $0^\circ$  y considerando que el talud que se generó en la excavación es completamente vertical, las deformaciones aumentan debido a que no existe un terreno al cual este sistema de anclajes pueda adherirse y transmitir en conjunto las cargas que se reciben. De igual forma, al contar con un alto grado de inclinación como lo es en el caso de  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , el sistema igualmente genera deformaciones mucho mayores al modelo calibrado que contaba con una inclinación de  $20^\circ$ , debido a que la zona de adherencia al suelo cada vez es menor a mitad que va aumentando este valor.



**Figura 4-6:** Inclinación de anclajes con y sin viga cabezal de las deformaciones en el tope para la excavación 3.

Por lo tanto, como se puede evidenciar en la figura 4-6 y como se había mencionado, el sistema de contención tiene un mejor comportamiento en sus deformaciones en el tope de la excavación cuando cuenta con una viga cabezal. Sin embargo, la diferencia de mejoras que existe entre estos dos sistemas es aproximadamente unos 2 mm en deformación. De igual forma, se aprecia el incremento entre ambos sistemas cuando se tiene una inclinación de unos  $0^\circ$ , pues en ella hay mayores deformaciones si se comparan entre los  $10^\circ$  y  $20^\circ$ .

Por ende, a partir de la anterior grafica se puede decir que un grado óptimo de inclinación ronda entre los  $10^\circ$  a  $20^\circ$  cuando el sistema no cuenta con una viga cabezal y para los rangos entre los 10 a  $30^\circ$  en los sistemas de contención que consideren una viga cabezal.

### 4.1.3 Diámetros

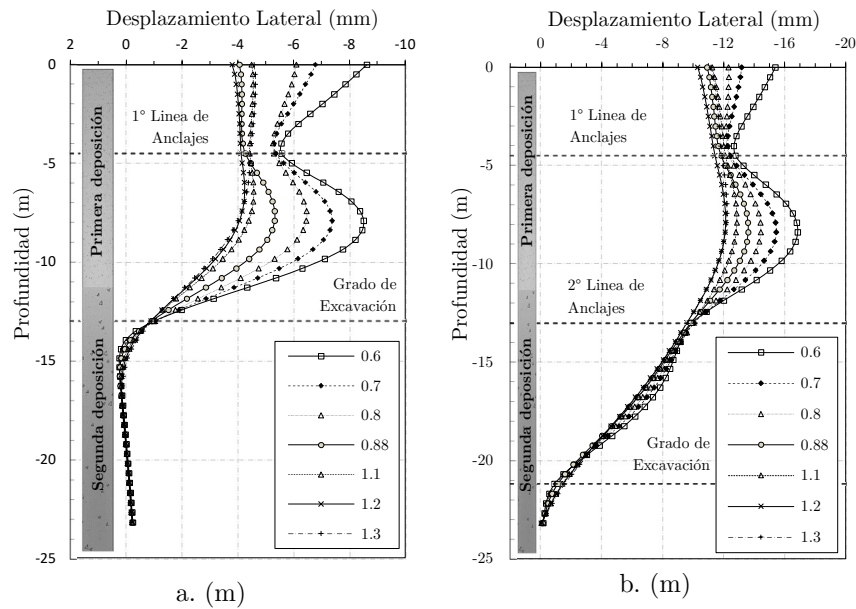


Figura 4-7: Diámetros con viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.

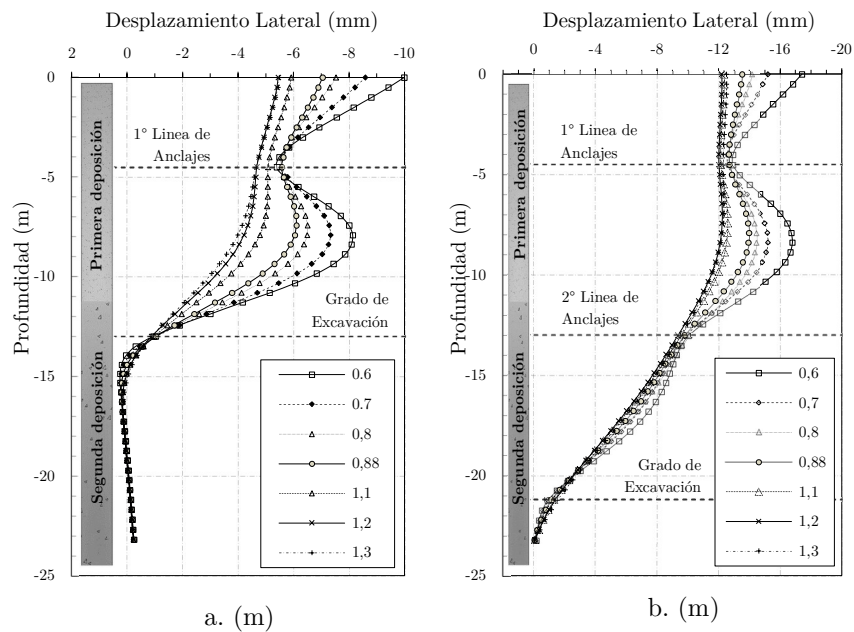


Figura 4-8: Diámetros sin viga cabezal donde a. son las deformaciones para la excavación 2 y b. son las deformaciones para la excavación 3.

Para el sistema con viga cabezal en la figura 4-7 se ve que la implementación de este elemento ayuda a controlar las deformaciones en el tope en la zona cero a nivel de terreno y que al aumentar los diámetros estas disminuyen en general para ambas etapas de excavación. Sin embargo, para la figura 4-7 a. en los diámetros de 1.1 m a 1.3 metros tienen una tendencia vertical a comportarse de la misma forma a la del modelo calibrado con un rango aproximado de 1 mm entre cada uno de ellos, a diferencia de los diámetros 0.6 m a 0.8 m, en donde se puede evidenciar un grado de pendiente hasta llegar a la primera línea de anclajes. Culminando todas las excavaciones para este sistema de contención con viga cabezal, se observa en la figura 4-7 b. que los diámetros tienen un incremento gradual en su deformación entre la zona de la 1° línea de anclajes y la 2° línea de anclajes a medida que este parámetro va disminuyendo. De igual forma, se puede identificar en esta misma figura, que la zona de implementación de anclajes registra las mayores deformaciones del sistema; siendo más exactos entre la profundidad de los -5 a los -13 metros.

Por otra parte, para el sistema sin viga cabezal en la figura 4-8 a. se pierda la verticalidad en las deformaciones en el tope de la excavación hasta llegar a la 1° línea de anclajes. De igual forma, para la tapa de excavación 2 se registran mayores deformaciones en la cota cero a nivel de terreno. Para la última etapa de excavación (figura 4-8 b.) sucede todo lo contrario en sus deformaciones máximas, ya que estas se encuentran en la zona de la 1° línea de anclajes y la 2° línea de anclajes, exactamente entre una profundidad de los -5 mm a los -13 mm.

En general para ambos sistemas (Con y sin viga cabezal) se puede deducir que a menor diámetro mayores deformaciones negativas se pueden tener en el sistema. De igual forma, la implantación de anclajes para ambos casos (Figura 4-7 y 4-8), tiene una incidencia alta en el comportamiento de las deformaciones. Debido a que en la zona donde se destinan estos elementos, las deformaciones son bastante similares a las del modelo calibrado. Por lo tanto, para estos sistemas la relación diámetro y número de anclajes, pueden ser elementos claves para el control de deformaciones al momento de ejecutar este tipo de excavaciones.

A continuación, en la figura 4-9 se representa la incidencia que tiene la viga cabezal al momento de variar cada uno de los diámetros para la etapa de excavación 3. En donde se

registró una deformación máxima de unos 3 mm para el diámetro 0.88, el cual es nuestro modelo calibrado. En los otros casos una variación de deformaciones de unos 2 mm aproximadamente. Por ende, para estos sistemas de contención, como se mencionó anteriormente, la viga cabezal controla mejor las deformaciones en el tope de la excavación.

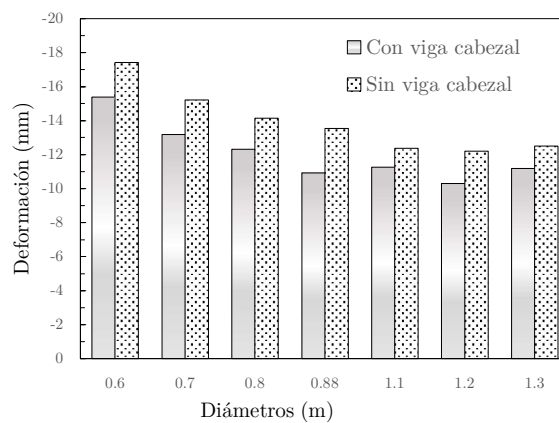


Figura 4-9: Diámetros con y sin viga cabezal de las deformaciones en el tope para la excavación 3.

#### 4.1.4 Longitud y módulo de elasticidad (E)

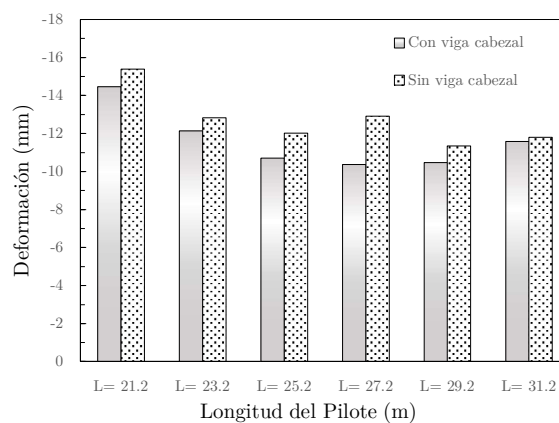


Figura 4-10: Deformaciones en el tope de la excavación con un módulo de elasticidad de 30 GPa a diferentes longitudes del pilote.

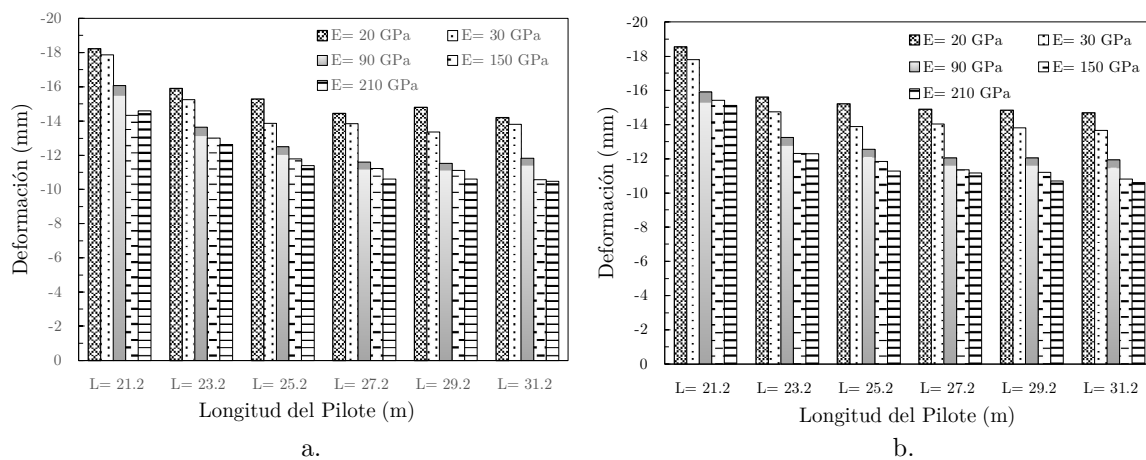
Para la figura 4-10 se tomó como referencia el módulo de elasticidad de 30 GPa, como se había definido para el caso de estudio, en donde se varió las profundidades de empotramiento en base a la longitud del pilote. Esta diferencia de parámetro muestra que



las deformaciones en el tope que tuvo el suelo en la cota cero a nivel del terreno, evidencia que a medida en que la longitud se va incrementando menores serán las deformaciones registradas.

Como lo es para los casos de longitud entre los 21.2 m a los 29.2 m para un sistema con viga cabezal, en donde se muestra un descenso gradual en las deformaciones y a los 31.2 m existe un leve incremento aproximadamente de 1 mm. En los casos donde el sistema no posee una viga cabezal, el descenso se aprecia entre las longitudes de 21.2 m a 25.2 m, a los 27.2 m hay un incremento aproximado de 1 mm y se vuelve a retomar la secuencia de reducción de deformaciones entre los 29.2 y los 31.2 m de longitud.

En general, para ambos casos (sistemas con y sin viga cabezal) la diferencia de descensos e incrementos se encuentran en un rango pequeño. En donde en el predomina más el descenso de las deformaciones cuando se cuenta con una mayor longitud del pilote. De igual forma, se observa que, para ambos sistemas, la viga cabezal cuenta indiscutiblemente con un control en las deformaciones que se generan en el suelo.



**Figura 4-11:** Deformaciones máximas registradas para la excavación 3 con diferentes módulos de elasticidad y longitud del pilote para el sistema a. con viga cabezal y b. sin viga cabezal.

Igualmente, también se hizo el registro de las deformaciones que se tienen cuando nuestro sistema cuenta con una variación en los módulos de elasticidad para diferentes longitudes de pilotes, como se muestra en la siguiente figura 4-1.

En ella se puede encontrar la incidencia que tiene en afectar el módulo de elasticidad, debido a que para ambos sistemas (con y sin viga cabezal) la diferencia de deformaciones

está entre un rango mínimo. Presentando para ambos medios, condiciones similares en tanto a su comportamiento y que estos dos parámetros (módulo de elasticidad y longitud del pilote) son proporcionales para el control del pilote.

Sin embargo, al realizar estas variaciones, se puede inferir que un sistema puede ser remplazado por otro. En otras palabras, cuando se cuenta con los pilotes con una viga cabezal, para el caso de una longitud de unos 23.2 m con un módulo de elasticidad de unos 210 GPa, este mismo puede ser remplazado por un el mismo sistema variando la profundidad a unos 29.2 m y con un módulo de elasticidad 90 GPa (figura 4-11 a.), ya que presentan el mismo comportamiento. Incluso el sistema puede ser mejorado sin apreciar una viga cabezal en él, solo aumentando el módulo de elasticidad y la longitud de empotramiento en él, por ejemplo, considerando una longitud de piloto de unos 25.2 m y un módulo de 150 GPa (figura 4-12 b.).

# Capítulo 5

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Los pilotes anclados y arriostrados lateralmente mediante anclajes son un mecanismo de retención para excavaciones ampliamente usado en zonas urbanas. Por lo tanto, su índice de influencia de afectación es bastante alto cuando no se consideran correctamente la selección de parámetros geométricos para un buen funcionamiento de este sistema. Gracias a la implementación del software MIDAS GTS NX, se logró hacer la calibración de un modelo numérico en 3D para el mecanismo de excavación realizado en el edificio parque Oriente localizado en la calle Cerro el Plomo con calle Alonso Córdova, Santiago de Chile; en donde a partir de la tesis del ingeniero Felipe Salas, se contó con las deformaciones tomadas en campo registradas bajo la instrumentalización de inclinómetros. Estas medidas ayudaron a ejecutar un caso estudio, el cual tuviera un comportamiento similar a las deformaciones registradas en campo.

A partir del modelo calibrado en 3D, se logró realizar las variaciones paramétricas en base a las condiciones geométricas del sistema de pilotes, a partir de las deformaciones registradas para cada caso. En donde se determinó la influencia de la sobrecarga, inclinación de anclajes, diámetros, longitud y módulo de elasticidad para el sistema de pilotes, teniendo como referencia dos panoramas, uno con viga cabeza y el otro sin este elemento.

En base a los análisis de los resultados registrados se tiene que cuando la sobrecarga varía, esta representa un índice alto en sus deformaciones a medida que esta

aumenta. De igual forma, la línea de anclajes (1° y 2° línea de anclajes) proporciona un bajo control en las deformaciones, cuando se tienen valores elevados de carga superficiales afectando y comprometiendo la estabilidad en los sistemas (con y sin viga cabezal). Por lo anterior, se recomienda incrementar la tensión de los anclajes cuando el sistema de retención se encuentre sometido a altos niveles de sobrecarga, con el propósito de disminuir las deformaciones del sistema de contención.

Para la inclinación de anclajes se registró que, al momento de tener unos niveles altos de inclinación, el sistema va perdiendo estabilidad y registrando mayores deformaciones, en un rango de 40° y 50°. Por otro lado, para valores bajos de inclinación entre 0° y 30°, generan un mayor control en las deformaciones y mayor estabilidad en el sistema de contención. Por lo tanto, se recomienda que para los grados de inclinación de los anclajes varíen entre 10° a 20°, ya que, el sistema de retención proporciona unas deformaciones menores ejecutando un buen funcionamiento entre suelo y estructura.

En los diámetros se encontró que a media que el área en los pilotes iba aumentando, sus deformaciones iban disminuyendo. Algo lógico para este caso, debido a que a media que su diámetro va aumentando, la separación entre ellos es menor; dejando a un lado el sistema de pilotes discontinuos y llegando a simular el comportamiento de un sistema de pilotes secantes. Comprometiendo las ventajas del sistema utilizado en nuestro de estudio, generado en si sobrecostos en materiales tales como concreto y acero. Por otro lado, los anclajes tienen un control alto para cuando se varían los diámetros de los pilotes. Estos elementos se pueden incorporar aumentando el número de líneas de anclajes a lo largo de la longitud del pilote. Proporcionando la libertad en poder reducir el diámetro del pilote libremente y hacer un mejor control de las deformaciones, únicamente comprometiendo el número necesario de líneas de anclajes y posicionamientos óptimos en profundidad a lo largo del pilote.

Otro de los parámetros que se tuvo en cuenta de igual forma, fue la longitud del pilote. Identificando que a mayor profundidad de empotramiento las deformaciones se reducen. Esta profundidad de longitud del pilote tiene un mejor comportamiento cuando está a un 40% de H aproximadamente de empotramiento en el suelo. Sin

embargo, esta característica puede representar para cualquier sistema unos sobrecostos, debido a que se está aumentando volumen de los materiales. Por ende, también se realizó un análisis paramétrico comprometiendo las propiedades del material, aumentando su respectivo módulo de elasticidad para el pilote a diferentes profundidades. Determinado, que a mayor módulo de elasticidad las deformaciones se iban a reducir considerablemente y más aún cuando se aumenta su longitud de empotramiento del sistema de pilotes.

Adicional a ello, todas variaciones anteriormente mencionadas se tuvieron en cuenta para sistemas con y sin viga cabezal. Este elemento es fundamental para cuando se hace un control de las deformaciones en el tope de la excavación. Debido a que, en todos los casos modelados, la influencia que tenía este elemento sobre el sistema era en sí, generar un poco de verticalidad en las primeras deformaciones, reduciéndolas aproximadamente en un 13%. De igual forma, es un elemento que ayuda a que el sistema en conjunto trabaja uniformemente, distribuyendo de forma paralela las carga que recibe.

Los parámetros geométricos de un sistema de pilotes anclados contribuyen mucho en el buen funcionamiento y control de deformaciones. Sin embargo, un buen modelo numérico y software proporcionan una amplia capacidad para poder determinar y seleccionar mejor estos parámetros. MIDAS GTS NX es un software que presentó un buen funcionamiento al momento de representar cada uno de los elementos que constituyen el suelo y la estructura, logrando así representar en él un modelo aproximado como se mencionó en la presente investigación.

## 5.2 Recomendaciones

Esta investigación comprende básicamente un análisis estático para el sistema de pilotes discontinuos. Sin embargo, como bien se conocen en el medio existen perturbaciones sísmicas que pueden comprometer la estabilidad del sistema. Por lo tanto, es importante evaluar de igual forma el sistema de retención en un ambiente dinámico y analizar como ayudan cada uno de estos elementos geométricos al control de deformaciones.

Por otro lado, solo se hizo un análisis a partir de las deformaciones, por lo tanto, también se podría complementar analizando la estabilidad y el factor de seguridad que se debe tener en la elección de cada uno de los parámetros anteriormente analizados.

Por último, se podría representar el mismo caso de estudio generando un modelo 3D a escala de toda la zona de la excavación. Debido que no se contaba con un equipo óptimo en la ejecución del análisis para modelo, los tiempos en que se traban eran bastante largos al no tener un equipo con amplia capacidad. Limitando en él bastantes condiciones, ya que solo se evaluó un sistema de contención con 5 pilotes.







# Bibliografía

- Addenbrooke, T. I., Potts, D. M., & Puzrin, A. M. (1997). *The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction* (Géotechniq).  
<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1997.47.3.693>
- Bilgin, Ö. (2009). Analysis of Anchored Sheet Pile Wall Deformations. *International Foundation Congress and Equipment Expo*.
- Bilgin, Ö. (2010). Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions. *Elsevier*.
- Diao, Y., Zhu, P., Jia, Z., Gang, Z., Du, Y., Shang, D., & Zhou, H. (2021). Stability analysis and safety factor prediction of excavation supported by inclined piles in clay. *Elsevier*.
- Emarah, D., & Selenn, S. (2016). COMPARISON BETWEEN SINGLE AND DOUBLE ANCHORED SHEET PILES WITH SIMPLIFIED APPROACHES TO SOLVE THE STATICALLY INDETERMINATE SYSTEMS. *Journal of Engineering Sciences Assiut University*.
- Emarah, D., & Selenn, S. (2018). A numerical study of anchored sheet piles subjected to different types of sandy soils backfill. *HBRC*.
- Emuriat, J. (2017). Parametric Study on Analysis and Design of Permanently Anchored Secant Pile Wall for Earthquake Loading. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*.
- Garcia, 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.
- GEO5. (2021). *Pantalla de Pilotes*. Software Geotécnico GEO5.

- <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/soluciones/diseno-de-excavacion/diseno-de-pantalla-de-pilotes/>
- Hong, S., Lee, F. ., & Yong, K. . (2022). Three-dimensional pile-soil interaction in soldier-piled excavations. *Elsevier*.
- Infrastructure news. (2017). *DR Pile wall drilled extremely near to old buildings in K6, Helsinki*. SSAB. <https://www.ssab.com/news/2017/06/rd-pile-wall-drilled-extremely-near-to-old-buildings-in-k6-helsinki>
- Keller. (2019). Pilotes perforados y muros de pilotes (pilotes “in situ”). *Soluciones Geotécnicas Para La Construcción*.
- Lacera, G. (2015). *MODELAMIENTO DE MUROS ANCLADOS PARA LA ESTABILIZACION DE EXCAVACIONES EN LA CONSTRUCCION DEL PROYECTO ISWARÁ DEL SECTOR COMERCIAL DEL MUNICIPIO DE BARRANCABERMEJA, SANTANDER*. Universidad de Santander.
- Leal, N., Camacho, J., & Ruiz, E. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. *Ingenierías Universidad de Medellín*. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/63/47>
- MIDAS. (2014). *MIDAS GTS NX*. [http://manual.midasuser.com/en\\_common/GTS NX/300/GTX.htm](http://manual.midasuser.com/en_common/GTS NX/300/GTX.htm)
- Morales, M. (2013). *Formulación de elementos finitos y elementos discretos*.
- Ochoa, D., Vivas, J., & Santafé, E. (2009). *USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UN MODELO DE POZO*.
- Presupuesto & Construcción. (2015). *SISTEMAS SEGUROS DE CONTENCIÓN PARA EXCAVACIONES PROFUNDAS. Año 25 N° 60*.
- Ramadan, H. (2017). *EFFECT OF WALL PENETRATION DEPTH ON THE BEHAVIOR OF SHEET PILE WALLS*. University of Dayton.
- Salas, F. (2018). Análisis dinámico de una excavación profunda contenida mediante pilotes anclados en la grava de Santiago. *Obras y Proyectos*.
- Salas Fontecilla, F. (2018). *MONITORING AND DYNAMIC ANALYSIS OF A DISCONTINUOUS PILE\_SUPPORTED DEEP EXCAVATION IN SANTIAGO GRAVEL*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE

- CHILE ESCUELA DE INGENIERI.
- Saucedo Sulzer, M. (2015). EJECUCION DE PILOTES ANCLADOS PARA LA CONTENCIÓN SEGURA DE LA EXCAVACION DE LA NUEVA ASAMBLEA LEGISLATIVA PLURINACIONAL. *Pilotes Terratest*.
- Smith, C., & Gilbert, M. (2007). Application of discontinuity layout optimization to plane plasticity problems. *Proceeding of the Royal Society*, 24.
- Universidad de Chile. (2013). *Beauchef Poniente-Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas*. <http://ingenieria.uchile.cl/campus-beauchef/beauchef-851/89084/beauchef-poniente>
- Universidad Nacional de Colombia. (2006). *ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LAS ISLAS UBICADAS EN EL RÍO MAGDALENA FRENTE A LA CIUDAD DE NEIVA*.
- Wang, C., Wang, H., Jiao, Y., Qin, W., & Tian, H. (2019). Optimal Design of a High Slope for Ice World & Water Park (IWWP) Built Over an Abandoned Quarry: A Case Study in Changsha of China. *Geotech Geol Eng*.
- Yepes, V. (2020). *Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención*. (2° Edición). Editorial Universitat Politècnica de València. [https://www.lalibreria.upv.es/portaEd/UpvGESTore/products/p\\_328-9-2](https://www.lalibreria.upv.es/portaEd/UpvGESTore/products/p_328-9-2)
- Zhao, W., Han, J.-Y., Chen, Y., Jia, P.-J., Li, S.-Ga., Li, Y., & Zhao, Z. (2018). A numerical study on the influence of anchorage failure for a deep excavation retained by anchored pile walls. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Zimmermann, T., Truty, A., & Podles, K. (2010). Numerics in geotechnics and structures. *Elmepress International*.