



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 26 de Septiembre de 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Angie Natalia Mendez Muñoz, con C.C. No. 1075321245,

Paula Andrea Aldana Gómez, con C.C. No. 1075316540,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

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

titulado Evaluación de fallas parciales en un sistema de contención continuo

de anclajes activos ante cargas sísmicas, mediante modelo en el software

midas GTS NX

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.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional 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

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.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Angie Natalia Mendez

Firma: Angie Natalia Mendez

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Paula Andrea Aldana

Firma: Paula Andrea Aldana Gómez

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Evaluación de fallas parciales en un sistema de contención continuo de anclajes activos ante cargas sísmicas, mediante modelo en software midas GTS NX.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Mendez Muñoz	Angie Natalia
Aldana Gómez	Paula Andrea

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

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

ASESOR (ES):

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

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil.

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Civil

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2022

NÚMERO DE PÁGINAS: 84

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general X Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros X

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional 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.



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Análisis Dinámico</u>	<u>Dynamic analysis</u>	6. <u>Fallas parciales</u>	<u>Partial Failures</u>
2. <u>Sismo</u>	<u>Earthquake</u>	7. _____	_____
3. <u>Estabilidad de taludes</u>	<u>Slope stability</u>	8. _____	_____
4. <u>Anclajes</u>	<u>Anchors</u>	9. _____	_____
5. <u>Midas GTS NX</u>	<u>Midas GTS NX</u>	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Los sistemas de contención conformados por muros de concreto reforzado con anclajes activos, se han empleado a lo largo del tiempo como soporte para excavaciones, vías, parqueaderos subterráneos, taludes inestables y demás, este tipo de sistemas presentan grandes ventajas en comparación con otros sistemas de reforzamiento de suelo, ya que su impacto de construcción es bajo en las edificaciones aledañas, son de fácil instalación, y su costo es menor comparado con otros sistemas de contención.

En el presente proyecto, se evaluó el comportamiento de un muro de contención continuo con anclajes activos ante diferentes condiciones sísmicas y se evaluó el comportamiento del muro cuando se presentan fallas parciales en algunos anclajes y el sistema de retención cuando es sometido a diferentes condiciones de sismo; el análisis dinámico fue considerado a partir de un modelo en elementos finitos 3D en el software MIDAS GTS NX calibrado con datos de campo, considerando señales sintéticas de diferentes tiempos de duración del sismo.

En el análisis realizado, se pudo observar que las fallas parciales en los anclajes modifican el comportamiento del muro cuando el sistema de retención es sometido a eventos sísmico, es decir, los valores de las fuerzas axiales en los anclajes y los esfuerzos cortantes sobre el muro se incrementan en los elementos cercanos al anclaje faltante. Por otro lado, se pudo evidenciar que la duración del sismo no genera cambios significativos en ninguno de los casos, y que los desplazamientos relativos se mantienen constantes, aunque se presenten fallas en los anclajes.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The retaining systems made up of reinforced concrete walls with active anchors have been used over time as support for excavations, roads, subway parking lots, unstable slopes, etc. These types of systems have great advantages compared to other soil reinforcement systems, because their construction impact on nearby buildings is low, they are easy to install, and their cost is lower compared to other retaining systems.

In the present project, the behavior of a continuous containment wall with active anchors was evaluated under different seismic conditions and the behavior of the wall was evaluated when partial failures of some anchors and the retaining system were present when subjected to different seismic conditions; the dynamic analysis was considered from a 3D finite element model in MIDAS GTS NX software calibrated with field data, considering synthetic signals of different seismic duration times.

In the analysis performed, it was observed that the partial failures in the anchorages modify the behavior of the wall when the restraint system is subjected to seismic events, i.e., the values of the axial forces in the anchorages and the shear forces on the wall increase in the elements near the missing anchorage. On the other hand, it was shown that the duration of the earthquake does not generate significant changes in any of the cases, and that the relative displacements remain constant, even when anchorage failures occur.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Juan Sebastián Peralta Ocampo.

Firma:

Nombre Jurado: Luz Divia Quimbaya Cuellar

Firma:



Evaluación de fallas parciales en un sistema de contención continuo de anclajes activos ante cargas sísmicas, mediante modelo en software midas GTS NX.

Angie Natalia Mendez Muñoz

Paula Andrea Aldana Gómez

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

2022

Evaluación de fallas parciales en un sistema de contención continuo de anclajes activos ante cargas sísmicas, mediante modelo en software midas GTS NX.

Angie Natalia Mendez Muñoz

Paula Andrea Aldana Gómez

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

Ingeniero Civil

Director:

M.Sc. Jackson Andrés Gil Hernández

Línea de Investigación:

Geotecnia

Universidad Surcolombiana de Colombia

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2022

Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos.

Marie Curie

Agradecimientos

Concluyendo esta etapa maravillosa de nuestra vida, queremos agradecer a todos los que hicieron parte de este proyecto brindándonos apoyo, motivación y fortaleza.

A Dios, nuestros padres, y hermanos, por demostrarnos que el amor también es un acto de inspirar a las personas.

Demostramos también nuestra gratitud a los docentes de la universidad Surcolombiana, y en especial a nuestro tutor Jackson Andrés Gil Hernández ya que con su apoyo y enseñanzas lograron constituir la base de nuestra vida profesional.

Gracias infinitas a todos.

Resumen

Los sistemas de contención conformados por muros de concreto reforzado con anclajes activos, se han empleado a lo largo del tiempo como soporte para excavaciones, vías, parqueaderos subterráneos, taludes inestables y demás, este tipo de sistemas presentan grandes ventajas en comparación con otros sistemas de reforzamiento de suelo, ya que su impacto de construcción es bajo en las edificaciones aledañas, son de fácil instalación, y su costo es menor comparado con otros sistemas de contención.

En el presente proyecto, se evaluó el comportamiento de un muro de contención continuo con anclajes activos ante diferentes condiciones sísmicas y se evaluó el comportamiento del muro cuando se presentan fallas parciales en algunos anclajes y el sistema de retención cuando es sometido a diferentes condiciones de sismo; el análisis dinámico fue considerado a partir de un modelo en elementos finitos 3D en el software MIDAS GTS NX calibrado con datos de campo, considerando señales sintéticas de diferentes tiempos de duración del sismo.

En el análisis realizado, se pudo observar que las fallas parciales en los anclajes modifican el comportamiento del muro cuando el sistema de retención es sometido a eventos sísmico, es decir, los valores de las fuerzas axiales en los anclajes y los esfuerzos cortantes sobre el muro se incrementan en los elementos cercanos al anclaje faltante. Por otro lado, se pudo evidenciar que la duración del sismo no genera cambios significativos en ninguno de los casos, y que los desplazamientos relativos se mantienen constantes, aunque se presenten fallas en los anclajes.

Palabras clave: Análisis dinámico, Sismo, estabilidad de taludes, anclajes, Midas GTS NX y fallas parciales.

Abstract

The retaining systems made up of reinforced concrete walls with active anchors have been used over time as support for excavations, roads, subway parking lots, unstable slopes, etc. These types of systems have great advantages compared to other soil reinforcement systems, because their construction impact on nearby buildings is low, they are easy to install, and their cost is lower compared to other retaining systems.

In the present project, the behavior of a continuous containment wall with active anchors was evaluated under different seismic conditions and the behavior of the wall was evaluated when partial failures of some anchors and the retaining system were present when subjected to different seismic conditions; the dynamic analysis was considered from a 3D finite element model in MIDAS GTS NX software calibrated with field data, considering synthetic signals of different seismic duration times.

In the analysis performed, it was observed that the partial failures in the anchorages modify the behavior of the wall when the restraint system is subjected to seismic events, i.e., the values of the axial forces in the anchorages and the shear forces on the wall increase in the elements near the missing anchorage. On the other hand, it was shown that the duration of the earthquake does not generate significant changes in any of the cases, and that the relative displacements remain constant, even when anchorage failures occur.

Keywords: Dynamic analysis, earthquake, slope stability, anchors, Midas GTS NX, partial failures.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	17
Capítulo 1	20
1. Introducción	20
1.1 Antecedentes	22
1.2 Justificación.....	24
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivos específicos	25
Capítulo 2	27
2. Marco teórico	27
2.1 Sistema de muros anclados.....	27
2.2 Anclajes activos.....	28
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.....	31
Capítulo 3	35
3. Metodología	35
3.1 Propiedades mecánicas y geométricas del perfil del suelo	36

3.2 Propiedades mecánicas y geométricas de la estructura de contención	38
3.3 Modelación del caso de estudio.....	40
3.4 Calibración del caso de estudio.....	45
3.5 Análisis Dinámico.....	47
3.5.1 Acelerogramas sintéticos.....	48
3.5.2 Espectro de diseño Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá.....	49
3.5.3 Transformada rápida de Fourier	51
3.6 Análisis paramétrico.....	52
3.6.1 Caso 1.....	54
3.6.2 Caso 2.....	55
3.6.3 Caso 3.....	58
3.6.4 Caso 4.....	60
3.6.5 Caso 5.....	62
Capítulo 4.....	64
4. Análisis de resultados.....	64
4.1 Resultados modelación numérica.....	64
4.1.1 Caso 1.....	64
4.1.2 Caso 2.....	65
4.1.3 Caso 3.....	67
4.1.4 Caso 4.....	68
4.1.5 Caso 5.....	68
Capítulo 5.....	70
5. Conclusiones y recomendaciones.....	70
5.1 Conclusiones.....	70
5.2 Recomendaciones.....	72
A. Anexo: Graficas y tablas casos de análisis.....	73
Bibliografía.....	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Proceso constructivo de sistema continuo. (Modificado de (Ugaz Sánchez, 2018)).	28
Figura 2-2: Partes de un anclaje Activo (modificado de (Sabatini et al., 1999)).	29
Figura 2- 3: Tipos de anclaje según la aplicación de lechada. (Modificado de (Sabatini et al., 1999)).	30
Figura 3-1: Metodología de desarrollo para el presente proyecto.	36
Figura 3-2: Perfil geotécnico Predominante. (modificado de (Vélez Velásquez, 2018)).	38
Figura 3-3: Esquema geométrico del sistema de contención mediante sistema de contención continuo de anclajes activos costado oriental. Nota: Unidades en metros.	39
Figura 3-4: Modelación del caso de estudio mediante software midas GTS NX.	40
Figura 3-5: a) Modelado geométrico, b) Modelado del sistema con su enmallado y c) Modelado con sus condiciones de frontera.	41
Figura 3-6: Deformaciones registradas para a. Etapa 19 (Vaciado de concreto), b. Etapa 24 (Instalación de anclaje y vaciado de concreto), c. Etapa 27(Instalación de platinas y pretensionamiento).	46
Figura 3-7: Localización de inclinómetros instalados para el registro de las deformaciones Modificado de:(Vélez Velásquez, 2018).	46
Figura 3-8: Ecuaciones espectro de diseño según microzonificación sísmica del municipio de Medellín Tomado de: (Alcadía de Medellín Municipio de Medellín , 2011).	49
Figura 3-9: Espectro de diseño, zona homogénea 13, microzonificación sísmica Valle de Aburrá.	50
Figura 3-10: Acelerogramas sintéticos para a. 20, b. 40 y c. 60 segundos con frecuencia de muestreo 100 Hz.	50
Figura 3-11: Espectros de Respuesta de acelerogramas sintéticos para señales de 20, 40 y 60 segundos basados en el espectro de diseño.	51

Figura 3-12: Transformada rápida de Fourier para una Frecuencia de muestreo de 100 Hz señales de 20,40 y 60 s figura 3-12.	52
Figura 3-13: Nomenclatura de anclajes.	54
Figura 3-14: Comparación desplazamientos relativos para señales de duración de 20s, 40s y 60s.	54
Figura 3-15 : Fuerzas axiales (kN) para sismos con intensidad de 20s, 40s y 60s.	55
Figura 3-16 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 1).	55
Figura 3-17: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 2) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.	56
Figura 3-18 : Fuerzas axiales (kN) (Caso 2) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.	57
Figura 3-19 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 2).	57
Figura 3-20: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 3) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.	58
Figura 3-21 : Fuerzas axiales (kN) (Caso 3) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.	59
Figura 3-22 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 3).	59
Figura 3-23: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 4) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.	60
Figura 3-24 : Fuerzas axiales (kN) (Caso 4) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.	61
Figura 3-25 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 4).	61
Figura 3-26: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 5) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.	62
Figura 3-27 : Fuerzas axiales (kN) (Caso 5) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.	63
Figura 3-28 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 5).	63
Figura A-1: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 1).	73
Figura A-2: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 2).	75
Figura A-3: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 3).	77

-
- Figura A-4:** Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de **a.** 20 segundos, **b.** 40 segundos, **c.** 60 segundos. (Caso 4). 79
- Figura A-5:** Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de **a.** 20 segundos, **b.** 40 segundos, **c.** 60 segundos. (Caso 5). 81

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Propiedades de los estratos del terreno (Modificado de: (Vélez Velásquez, 2018)).	37
Tabla 3-2 Propiedades de los anclajes en el sistema de contención	40
Tabla 3-3: Sistema Constructivo implementado para el caso de estudio.	45
Tabla 3-4: Profundidad alcanzada por los inclinómetros instalados. Tomado de: (Velásquez, 2018).	47
Tabla 3-5: Casos de análisis evaluando el sistema con todos los anclajes.	52
Tabla 3-6: Casos de análisis evaluando el sistema con fallas parciales de los anclajes.	53
Tabla A-1: Resultados desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos.	74
Tabla A-2: Resultados desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos.	74
Tabla A-3: Resultados desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos.	74
Tabla A-4: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en el anclaje 23.	75
Tabla A-5: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 20s Vs. Modelo con falla en el anclaje 23.	76
Tabla A-6: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en el anclaje 23.	76
Tabla A-7: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 40 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 23.	76
Tabla A-8: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en el anclaje 23.	76
Tabla A-9: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 60 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 23.	76
Tabla A-10: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en los anclajes 23 y 24.	77

Tabla A-11: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 20 s Vs. Modelo con falla en los anclajes 23 y 24.	78
Tabla A-12: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en los anclajes 23 y 24.	78
Tabla A-13: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 40 s Vs. Modelo con falla en los anclajes 23 y 24.	78
Tabla A-14: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en los anclajes 23 y 24.	78
Tabla A-15: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 60 s Vs. Modelo con falla en los anclajes 23 y 24.	78
Tabla A-16: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en el anclaje 3.	79
Tabla A-17: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 20 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 3.	80
Tabla A-18: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en el anclaje 3.	80
Tabla A-19: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 40 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 3.	80
Tabla A-20: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en el anclaje 3.	80
Tabla A-21: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 60 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 3.	80
Tabla A-22: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en el anclaje 38.	81
Tabla A-23: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en el anclaje 38.	82
Tabla A-24: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en el anclaje 38.	82

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
a	Aceleración	m/s ²	Figura 3-8
A_i	Amplitud de fase	-	Figura 3-8
a_{smax}	Aceleración máxima	m/s ²	Figura 3-8
C	Cohesión	Kpa	Tabla 3-1
D	Matriz de relación tensión deformación	-	Ec. 2-4
d^e	Grados de libertad de los nudos del elemento	°	Ec. 2-3
E_{50}^{ref}	Rigidez secante en ensayo triaxial	Kpa	Tabla 3-1
E_{oed}^{ref}	Rigidez Tangencial en ensayo con edómetro	Kpa	Tabla 3-1
E_{ur}^{ref}	Rigidez por carga / descarga	Kpa	Tabla 3-1
F	Fuerza	KN	Figura 4-1
F_a	Coefficiente de amplificación de ondas	-	Figura 3-8
g	Gravedad	m/s ²	Subcapítulo 3.3
G	Aceleración debido a la gravedad	-	
G_z	Giro eje z	-	Subcapítulo 3.3
I	Coefficiente de importancia	-	Figura 3-8
$I(t)$	Intensidad envolvente		Ec. 3-1
N	Función de forma	-	Ec. 2-3
ν	Relación de Poisson	-	Tabla 3-1
S_a	Seudoaceleración	-	Figura 3-8
S_{amax}	Seudoaceleración máxima	-	Figura 3-8

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
t	Tiempo	s	Figura 3-10
	Periodo de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones	s	Figura 3-8
T_0			
T_C	Periodo de vibración, transición entre la zona de aceleración constante	s	Figura 3-8
u	Desplazamientos	m	Ec. 2-1
w_i	Frecuencia de fase	Hz	Figura 3-8
z	Profundidad de excavación	m	Tabla 3-3

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Exponente para ser utilizado en el cálculo del periodo T_c	-	Figura 3-8
γ	Peso unitario	KN/m ³	Tabla 3-1
δG_{ext}	Trabajo virtual debido a fuerzas externas	-	Ec. 2-1
ε	Deformaciones	m	Ec. 2-1
$\varepsilon(\sigma)$	Deformación calculada a partir del esfuerzo	KN/m	Ec. 2-2
σ	Esfuerzos	KN/m ²	Ec. 2-1
$\sigma(\varepsilon)$	Esfuerzos calculados a partir de las deformaciones		
\varnothing_i	Conjunto de ángulos de fase	°	Ec. 3.1

Subíndices

Subíndice	Término
K_0	Condiciones iniciales
i	Iteración

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
$2D$	Bidimensional
$3D$	Tridimensional
<i>Ancl.</i>	Anclaje
<i>DR</i>	Desplazamientos Relativos
<i>Excav.</i>	Excavación
<i>FFT</i>	Transformada rápida de Fourier
<i>GA-PSO</i>	Algoritmo genético-Optimización por enjambre de partículas
<i>GLE</i>	Método general de equilibrio límite
<i>HS</i>	Hardening Soil
<i>MASK</i>	Ensayo de dispersión de ondas superficiales
<i>MEF</i>	Método de elementos finitos
<i>Pret.</i>	Pretensionamiento
<i>SPT</i>	Ensayo de Penetración estándar
<i>UU</i>	Modalidad no consolidada no drenada

Capítulo 1

1. Introducción

La infraestructura en las ciudades aumenta de manera proporcional al crecimiento de la población, y a medida que esta avanza, se hace necesario generar un aprovechamiento del espacio, realizando grandes excavaciones a gran profundidad, que requieren grandes movimientos de masa de suelo, por lo cual, se deben construir estructuras de contención que garanticen la estabilidad y protección de las estructuras aledañas (Lacera Torres, 2015).

En la actualidad, existen diferentes sistemas de contención como pilotes anclados, pilotes en voladizo, y varios tipos de muros anclados, entre otros. Los muros anclados se caracterizan por ser un sistema de fácil instalación, bajo costo, y que permiten realizar excavaciones a gran profundidad sin perjudicar las edificaciones colindantes; en este sistema de retención los empujes generados por el suelo son contrarrestados mediante anclajes pretensados, y la capacidad del muro está en función de la capacidad de los anclajes; es por lo anterior, que estas estructuras son una buena alternativa para excavaciones de gran magnitud (Lucero Pardo et al., 2012).

Los anclajes como elementos estructurales de los sistemas de contención de los muros anclados componen una parte esencial del sistema, ya que estos permiten introducir tensiones y deformaciones adicionales en la masa del suelo, mejorando la estabilidad general. Por otra parte, el método de instalación, simultáneamente con los aspectos geológicos más resaltantes juegan un papel preponderante en el diseño del soporte (Navarro, 2002).

Es importante aclarar que los anclajes pueden dividirse en dos tipos, anclajes pasivos y activos; el anclaje pasivo es aquel cuya armadura no se pretensa después de su instalación, este entra a tracción una vez empiezan a producirse deformaciones en la masa de suelo; el anclaje activo es aquel que una vez instalado se pretensa su armadura hasta alcanzar su carga admisible, comprimiendo el suelo contenido entre la zona de anclaje y la placa de apoyo de la cabeza. (Rengifo Reateguá, 2015). La construcción de un anclaje comprende desde el correcto proceso de perforación, colocación de tirantes, inyección de morteros y fraguado, hasta el tensionamiento de los cables y su uso contrarresta la acción de las fuerzas desestabilizadoras e incrementa la resistencia al esfuerzo cortante del terreno mediante la transmisión de fuerzas externas a la profundidad de diseño.

A lo largo de los años se han realizado investigaciones sobre muros de contención anclados, como en la investigación de Gabriel Lacera en el 2015, en la cual realizo el modelamiento de este tipo de sistemas mediante el uso de herramientas computacionales como PLAXIS, determinando que su uso para estabilización de excavaciones ofrece ventajas económicas y técnicas con respecto a sistemas convencionales (muros de gravedad muros de semi-gravedad, muros de voladizo, Muros con contrafuertes) (Lacera Torres, 2015). Por otro lado, Jafar Maleki y demás, realizaron un estudio integral por medio del método de elementos finitos para el diseño de sistemas de muros anclados para excavaciones profundas apoyados en el software PLAXIS 2D, en la cual, mediante la aplicación del modelo constitutivo Hardening Soil, hallaron parámetros para el diseño óptimo de este tipo de sistema, condensando la información en una serie de gráficas y tablas, proponiendo una relación practica para su diseño (Maleki et al., 2022).

Aunque a la fecha se han realizado diferentes investigaciones relacionadas sobre los muros anclados, aún no hay suficiente claridad sobre el comportamiento de este tipo de estructuras ante eventos sísmicos. Es por lo anterior, que esta investigación busca realizar la evaluación de fallas parciales en sistemas de contención continuos con anclajes activos ante cargas sísmicas, a partir de un modelo en elementos finitos calibrado con datos de campo, mediante el software midas GTS NX.

1.1 Antecedentes

A la fecha, diferentes autores han llevado a cabo investigaciones sobre el comportamiento de los sistemas de contención, buscando optimizar el diseño de los mismos ante diferentes condiciones, entre estas se destaca la investigación realizada por el ingeniero Pablo Vélez en el año 2018 en la cual mediante la calibración con datos de campo de un modelo de elementos finitos en el programa phase2 evaluó la viabilidad técnica de las estructuras de contención construidas con barras de acero o tubos inyectados para la adecuación del terreno y posterior construcción de tres niveles de sótano en una edificación levantada en el municipio de Medellín, concluyendo que el uso de estas barras de acero brindaban un factor de seguridad igual o superior al requerido, movimientos laterales estimados menores a los movimientos laterales permisibles y que presenta ventajas económicas en cuanto a la reducción significativa en tiempo de construcción.

Andrés Benavente y José Echenique en el 2017 buscaron determinar cuál era la influencia del sismo en muros de contención en voladizo de acuerdo con las diferentes zonas sísmicas del Perú, para lo cual, por medio de la aplicación los métodos de Mononobe - Okabe, así como el método general de equilibrio limite (GLE) determinaron que la aceleración sísmica y el talud de relleno son los parámetros que en realidad afectan el valor final de la influencia del sismo, al contrario de la altura de los muros el cual resultó ser solamente un valor de proporcionalidad para la fuerza, un valor de escala (Ballón Benavente & Echenique Sosa, 2017).

Con el fin de justificar el uso de sistemas anclados en la estabilización de excavaciones profundas para la construcción de tres sótanos subterráneos, Gabriel Lacera realizo en el 2015 el modelamiento de muros anclados aplicando la metodología de diseño RIGID, la cual basado en la teoría de equilibrio limite, considera la analogía que, un muro se comporta como una viga apoyada en soportes rígidos. En adición a esto, empleó simultáneamente las herramientas computacionales Slide, PLAXIS, Dynamic Probing de Geotru, con las cuales logró determinar que el uso de muros anclados para la estabilización de excavaciones ofrece muchas ventajas económicas y técnicas con respecto a los sistemas convencionales (Lacera Torres, 2015).

En 2018, Johan Hernán Ugaz empleó un análisis técnico comparativo apoyado con el software GGU retain, GEO5, sobre el uso de muros anclados y muros empotrados para

excavaciones profundas, en suelos con grava y zonas con relleno en la ciudad de Lima-Perú. Para el análisis, diseñó los dos sistemas para tres niveles de sótanos de aproximadamente 9,2 m de un edificio multifamiliar de 600 m² con 8 pisos ubicados en el centro de la ciudad de Lima. Según lo observado concluyó que los dos métodos garantizan la estabilidad de este tipo de suelos y considerar uno en especial dependía de factores como el alcance de la estructura y la viabilidad económica en su construcción ya que la logística y cantidad de insumos consumibles de los equipos para la construcción de un muro empotrado era exorbitante para un proyecto de las dimensiones planteadas (Ugaz Sánchez, 2018).

Cheng et al., (2016) analizaron el comportamiento de un sistema de contención conformado por pilotes cuando se presentaban fallas en cada uno de sus elementos; utilizando el modelo tridimensional de diferencias finitas, simularon los colapsos de manera parcial y progresiva de 20 pilotes contiguos en voladizo de 16 metros de longitud, 0,8 m de diámetro, espaciados cada 1 m que brindaban soporte a excavaciones cuadradas y de franjas largas de 40 m*20 (o 50 m) *20m (X*Y*Z). En el análisis realizado determinaron que, ante un colapso parcial se generaba una redistribución en las presiones del suelo aumentando los momentos de flexión de los pilotes adyacentes, y que además, el factor de seguridad de la capacidad portante de los pilotes es importante para determinar si se puede presentar un colapso progresivo con determinadas condiciones de colapso parcial (Cheng et al., 2016) .

Maleki et al., (2022) propusieron un marco de diseño racional para muros anclados basados en los resultados de un gran número de estudios paramétricos en los cuales se usó el método de los elementos finitos. Para ello, se apoyaron en el software plaxis 2D simulando las excavaciones suelo-anclaje, siguiendo las directrices de la FHWA (Federal highway administration) mediante la aplicación de un modelo constitutivo Hardening Soil (HS). La investigación concluye que después de realizar aproximadamente 22.091 modelos numéricos, sus resultados presentados en gráficos y tablas se pueden usar fácilmente para un diseño preliminar de muros anclados basado en el desempeño de las excavaciones, los cuales deben ser examinados y modificados de acuerdo con las condiciones específicas del sitio del proyecto, además que mediante el análisis de datos utilizando una técnica de algoritmo GA-PSO, se puede proponer una única relación práctica que se puede utilizar para predecir cuatro medidas principales de desplazamiento (la deflexión horizontal máxima del muro frontal, la deflexión horizontal de la parte superior del muro frontal, el

levantamiento máximo en la parte inferior de la base de la excavación y asentamiento máximo en la superficie del suelo adyacente a la excavación) con alta precisión para excavaciones profundas apoyadas en un sistema de muros anclados (Maleki et al., 2022).

Xi y Yu Huang, en 2021, realizaron un análisis paramétrico de muros de contención anclados y con pilotes bajo carga sísmica con el fin de evaluar la estabilidad del talud bajo las condiciones de diferentes parámetros estructurales, por lo cual emplearon un análisis dinámico mediante la modelación de elementos finitos de un sistema de contención conformado por un muro de 10 m de altura con un pilote de 4 m longitud y un anclaje de 15 m. Para derivar la respuesta dinámica de tiempo-historia de la estructura de pilote-anclaje, aplicaron el desplazamiento permanente de Newmark como índice para evaluar los parámetros estructurales que afectan la estabilidad sísmica del talud reforzado considerando el empotramiento del pilote, el espesor del pilote, posición del anclaje en el pilote, longitud libre del anclaje, dirección del anclaje y pretensado del anclaje. Concluyendo qué, según la carga dinámica que se aplique, los elementos estructurales presentan unos parámetros geométricos predilectos lo cual se traduce en mejoras en el rendimiento del sistema, en su resistencia al corte, y flexión (Xu & Huang, 2021).

Considerando que a la fecha son pocas las investigaciones sobre el comportamiento sísmico de los muros anclados ante fallas parciales en el sistema de ancles, esta investigación busca analizar el comportamiento de un sistema de contención conformado por un muro anclado cuando se presentan sismos de diferente magnitud, duración y fallas parciales en sus elementos estructurales, de esta manera, se ampliaría el conocimiento sobre las consecuencias de estas fallas en este tipo de estructuras, con el fin de que la repercusión de los sismos y las eventuales fallas en sus anclajes sea contemplada desde el inicio del diseño como una alternativa que impida el colapso del sistema.

1.2 Justificación

Por su ubicación, en Colombia se presentan sismos de diferente magnitud de manera periódica en las diversas zonas del país, que a lo largo de los años se han convertido en un reto para los profesionales de la ingeniería civil, quienes buscan garantizar la seguridad de sus obras mediante la implementación de diseños sismo resistentes. No obstante, en Colombia no se ha profundizado en el estudio del comportamiento dinámico que presentan

diferentes estructuras de contención pese a la importancia que estas representan, ya que son estructuras de uso cotidiano en diferentes proyectos.

Los muros continuos con anclajes activos son un sistema de contención ampliamente implementado en suelos que presentan grandes movimientos en masa, ya que, comparado con una estructura de contención tradicional, está compuesto por un sistema de tendones pretensionados anclados en el suelo, que le permiten soportar diferentes tipos de empujes. Sin embargo, se desconoce el comportamiento que pueda presentar este tipo de estructuras si se llegase a presentar una falla en alguno de sus anclajes. Es por esto, que esta investigación busca ejecutar un análisis dinámico por medio de una modelación por el método de elementos finitos de un muro anclado, donde se represente el colapso parcial de anclajes sobre el sistema de retención, y se evalúe la incidencia de la falla de los anclajes en el comportamiento esfuerzo- deformación del muro.

1.3 Objetivos

Realizar la evaluación de fallas parciales en sistemas de contención conformados por muros apuntalados con anclajes activos ante cargas sísmicas, a partir de un modelo en elementos finitos calibrado con datos de campo, mediante el software midas GTS NX.

1.3.1 Objetivos específicos

- Calibrar modelo de elementos finitos que represente un muro de contención continuo con anclajes en el software MIDAS GTS NX.
- Evaluar el comportamiento del sistema de contención calibrado, cuando éste presente fallas parciales en los anclajes y se encuentre sometido ante cargas sísmicas.
- Analizar la redistribución de esfuerzos y deformaciones en sistemas continuos anclados cuando se presentan fallas parciales en el sistema, y el sistema es sometido a cargas sísmicas.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1 Sistema de muros anclados

Un sistema de contención con muro anclado consiste en un tipo de muro de gravedad o semigravedad, que se sujeta al suelo por medio de un sistema de anclajes compuesto por un cable pretensado (anclajes activos) o postensado (anclajes pasivos) y con un bulbo embebido en lo profundo del talud, sistema que permite contrarrestar las fuerzas desestabilizadoras, tales como los empujes propios del suelo, la presión del agua, sobrecargas, etc. Estos sistemas son utilizados cuando se tienen longitudes de empotramiento de más de 6 m, ya que cuando se tienen esfuerzos demasiado grandes en el terreno, se dificulta la instalación de sistemas convencionales, es por ello, que utilizar un sistema de anclajes contribuyen a soportar los esfuerzos generados, al tiempo que se reduce la longitud de empotramiento del suelo.(Ugaz Sánchez, 2018).

La construcción de muros anclados se da en cuatro etapas, como se evidencia en la Figura 2-1. En primer lugar, se inicia con la excavación del sitio en el cual se plantea la construcción de la estructura, teniendo en cuenta, el tipo de suelo del terreno, así como los detalles de las edificaciones vecinas y las interferencias que se pueden presentar. Una vez se cuenta con la excavación, se procede con la ubicación del punto de anclaje, para esto, se debe verificar con anterioridad el ángulo y longitud de la perforación, garantizando que se pueda generar el pretensionamiento de manera óptima. Después de la perforación, se instala el cable guardando el espacio que permita la aplicación de la lechada. Posteriormente, se realiza la construcción del muro pantalla, posicionando el acero de refuerzo para el vaciado del concreto. Por último, se tiene la etapa de tensado, en la cual

se debe esperar que el concreto alcance su resistencia adecuada para el tensionamiento de los anclajes (Ugaz Sánchez, 2018).

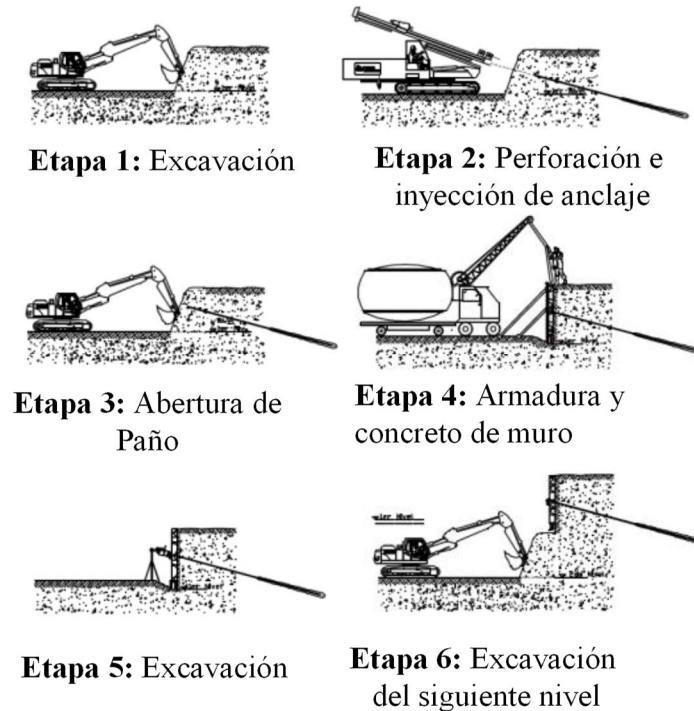


Figura 2-1: Proceso constructivo de sistema continuo. (Modificado de (Ugaz Sánchez, 2018)).

2.2 Anclajes activos

Un anclaje, es un elemento estructural que se emplea para estabilizar y soportar estructuras, tanto de suelos naturales o artificiales, los cuales se encuentran sometidos a fuerzas laterales restringiendo el desplazamiento o giro.

Los anclajes activos, son aquellos en los cuales el elemento estructural es pretensado para aplicar una carga normal a la superficie de apoyo desde el momento de su instalación. Se dividen en tres zonas las cuales se componen de la cabeza del anclaje, una zona de longitud libre de cable que permite la transmisión de carga a la zona del bulbo. (Sabatini et al., 1999).

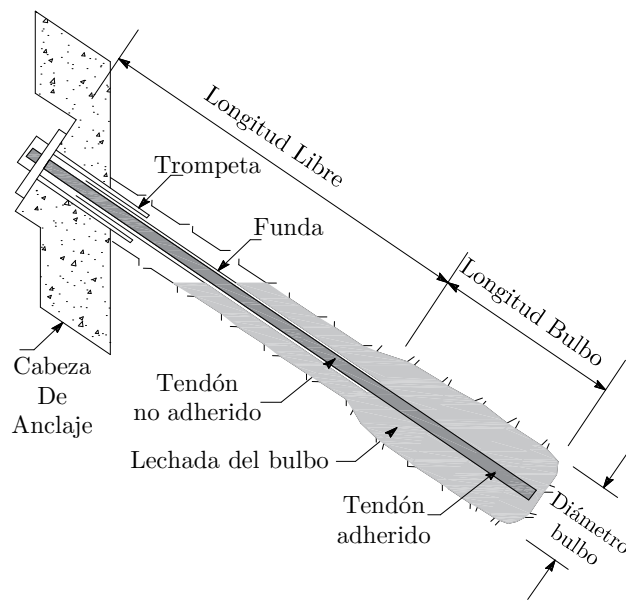


Figura 2-2: Partes de un anclaje Activo (modificado de (Sabatini et al., 1999)).

2.2.1 Zona o bulbo de anclaje

Se conoce como zona de bulbo al material compuesto de lechada de cemento, no menor de 6 m, que recubre la barra y se encuentra embebido a una determinada profundidad de manera que se logre transferir los esfuerzos al terreno. Según la presión de aplicación de la lechada, se pueden clasificar como se muestra en la figura 2-3 (Figuroa Díaz et al., 2011).

Tipo A. Inyección por gravedad. Requiere de una perforación de más de 10° con respecto a la horizontal. Su uso es más común en suelo cohesivos duros y su resistencia depende de la interacción entre el bulbo y el suelo

Tipo B. anclajes inyectados por presión. Es aplicada a presiones mayores de 50 psi, filtrándose en las fisuras de las rocas o entre los espacios de suelos granulares gruesos, generando un aumento en los esfuerzos normales en la pared.

Tipo C. Anclajes inyectados por presión por etapas. Se aplica a presiones mayores de 290 psi, generando un bulbo de mayor tamaño en suelos tanto cohesivos como no cohesivos debido a la fractura hidráulica del suelo.

Tipo D. Anclajes de bulbo taladrado de campanas múltiples. Al inyectar por gravedad la lechada se evidencia una forma de campana en la perforación.(Figuroa Díaz et al., 2011).

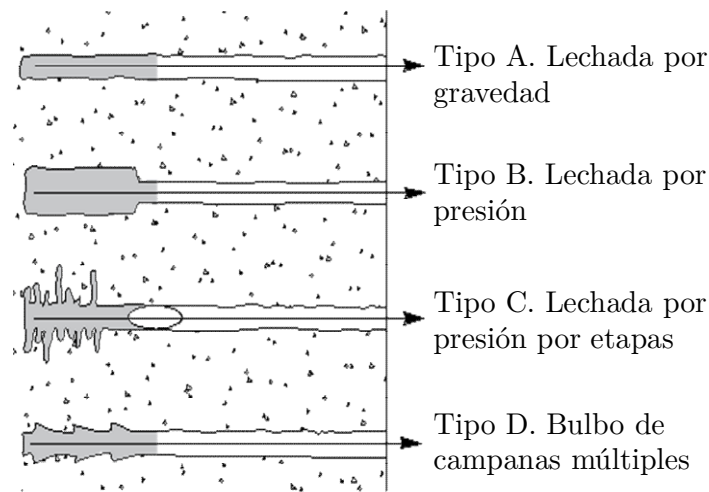


Figura 2- 3: Tipos de anclaje según la aplicación de lechada. (Modificado de (Sabatini et al., 1999).

2.2.2 Zona libre

La zona libre de los anclajes es aquella que se encuentra entre la cabeza y el bulbo con total independenciamiento del terreno, es decir, que no tiene ningún tipo de contacto con el suelo que la rodea. Para garantizar esta longitud, se construyen camisas en materiales como PVC o metálicas, permitiéndole una libre deformación al ser aplicadas las tensiones en el elemento (Figuroa Díaz et al., 2011).

2.2.3 Cabeza

La cabeza es el elemento que une la armadura con la placa de apoyo, que puede estar compuesto por tuercas, en caso de usarse barras o por conos mancho-hembra en el caso de cables. Esta debe ser capaz de soportar las tensiones que se apliquen al sistema, además, de transmitir las cargas que se generen en la armadura al terreno o a la estructura principal (Figuroa Díaz et al., 2011).

2.3 Método de elementos finitos (MEF)

El método de elementos finitos (MEF) es un método usado ampliamente en el área de la ingeniería y la física, ya que, permite obtener una solución aproximada empleando ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento de un cuerpo, estructura o dominio. Este método, reduce a una escala menor el modelo convencional, dividiéndolo en partes más pequeñas permite que la computadora realice un análisis de manera más específica y rápida, ya que, identifica con mayor exactitud los puntos en los cuales se concentran los esfuerzos o deformaciones discretizando los elementos finitos con comportamientos y propiedades definidas. Generalmente, este tipo de análisis se realiza mediante programas computacionales que permiten realizar los cálculos de campo de desplazamientos, así como, deformaciones y tensiones. (Molina Orbea & Pimentel Pimentel, 2021).

Estos elementos que se generan unos puntos llamados nodos, que los conectan entre sí, y los cuales, considerando su relación de adyacencia, forman lo que se conoce como “malla”, la cual se genera de manera previa a la realización de los cálculos, de manera que, mediante este conjunto de nodos se transfiera la información completa del modelo entre los diferentes elementos. La precisión de este modelo depende en su mayoría del tamaño y tipo de los elementos y nodos que conformen la malla, es así, que, con mayores divisiones, más preciso será el resultado (Molina Orbea & Pimentel Pimentel, 2021).

2.4 Software midas GTS NX

El software midas GTS NX es un programa de simulación desarrollado para la evaluación de la interacción suelo-estructura basado en el método de elementos finitos en 3D y 2D, éste sirve de apoyo para realizar un análisis paso a paso de los factores que afectan directamente al diseño y la construcción, además que soporta diferentes condiciones del suelo como sus características físicas, nivel de agua, entre otras, con el fin de simular fenómenos reales (MidaSoft, 2019).

Se pueden configurar las condiciones del suelo usando métodos de análisis estáticos lineales/no lineales, análisis dinámicos, de infiltración, consolidación, análisis de seguridad

de taludes y varios análisis acoplados como el de infiltración-tensión, tensión-pendiente, infiltración-pendiente y el análisis no lineal dinámico-pendiente.

Para realizar la modelación geotécnica, se apoya en las propiedades del material suelo/estructura, considerando 4 tipos (isotrópico, ortotrópico, equivalente 2D, interfaz/pilote) y las propiedades de comportamiento del material (estático lineal, elastoplástico, no lineal elástico).

El análisis del suelo realizado por el programa se puede explicar realizando una comparación con el análisis estructural general. El análisis estructural da mayor importancia a la incertidumbre de la carga que actúa sobre la estructura, por lo tanto, realiza el diseño de los miembros para la mayor fuerza obtenida mediante la combinación sistemática de varios resultados. Por el contrario, el análisis del suelo se centra más en la inseguridad del paso de la construcción y del material en sí, que, en la carga, por lo que es importante entender el estado físico dentro del suelo. En consecuencia, para el análisis del suelo, es necesario utilizar elementos sólidos en el modelado para reflejar la forma del terreno y la situación de la construcción; y es necesario considerar los materiales anisotrópicos no lineales y los estados de tensión in situ para reflejar las condiciones reales in situ en la medida de lo posible (MidaSoft, 2019).

El programa para el análisis del suelo puede utilizarse para simular las condiciones in situ y determinar si las condiciones de diseño o de construcción son adecuadas; se cubren varios tipos de análisis, desde el análisis estático general hasta el análisis de infiltración, el análisis acoplado de tensión-sedimentación, el análisis de consolidación, el análisis de la fase de construcción, el análisis de la estabilidad de los taludes, etc. (MidaSoft, 2019).

Como ya se había mencionado, los elementos que conforman el modelo computacional se analizan con el método de los elementos finitos. Para la resolución de las ecuaciones diferenciales que actúan sobre los cuerpos, se aplica el Principio de trabajo virtual. Que se expresa de la siguiente manera (Freire Rosero, 2015; Molina Orbea & Pimentel Pimentel, 2021):

$$G_{ext} = \int_{\Omega}^0 (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \varepsilon^T (\sigma(\varepsilon) - \sigma) + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon) d\Omega \quad Ec. 2 - 1$$

$$\nabla = \text{Operador Nabla} \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

La ecuación anterior es la forma más general que incluye la ecuación de equilibrio, la ecuación constitutiva y la condición de compatibilidad. Si se supone que la relación de deformación y esfuerzos siempre se satisface mediante la ecuación constitutiva, se obtiene el principio de Hellinger-Reissner de la siguiente manera (Freire Rosero, 2015; Molina Orbea & Pimentel Pimentel, 2021):

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega}^0 (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon(\sigma)) d\Omega \quad \text{Ec. 2 - 2}$$

Suponiendo que la relación entre ε y u se satisfaga mediante condiciones adecuadas adicionales, la ecuación se convierte en el principio general del trabajo virtual:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega}^0 (\nabla \delta u)^T \sigma(u) d\Omega \quad \text{Ec. 2 - 3}$$

En la ecuación 2-3 se limita la región de integración como un solo elemento para aplicar el principio de trabajo virtual en el método de elementos finitos. Interpolando el desplazamiento como función de forma dentro de un solo elemento da la siguiente ecuación:

$$u^h = N d^e \quad \text{Ec. 2 - 4}$$

Usando la relación deformación desplazamiento $\varepsilon^h = \nabla u^h = u B d^e$, el principio de trabajo virtual para todo el elemento se puede expresar de la siguiente manera:

$$\delta G_{ext} = \delta \sigma^T F = \delta \sigma^T \left[\sum_{\Omega_e}^0 \int_{\Omega_e}^0 B^T D B d \Omega \right] d = \delta \sigma^T K d \quad \text{Ec. 2 - 5}$$

En el análisis lineal, la matriz de rigidez total K es independiente de los grados de libertad total de los nodos y la rigidez de los elementos individuales K_e se puede expresar de la siguiente manera:

$$K^e = \int_{\Omega_e}^0 B^T D B d \Omega d \quad \text{Ec. 2 - 6}$$

La ecuación 2-6 es aplicable para los análisis elásticos con pequeños desplazamientos, pero también puede ser aplicado para un análisis no lineal usando el mismo principio (Freire Rosero, 2015; Molina Orbea & Pimentel Pimentel, 2021).

Capítulo 3

3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología empleada para efectuar un análisis dinámico de un sistema de contención compuesto de una pantalla apuntalada por anclajes activos. EL análisis fue realizado mediante un modelo numérico en elementos finitos (MEF 3D) calibrado con datos de campo, y el propósito del análisis fue evaluar el comportamiento de la estructura ante las fallas parciales en los anclajes. La calibración del modelo numérico fue basada en los datos de la tesis en la tesis del Ingeniero Vélez (Vélez Velásquez, 2018), quien evaluó la viabilidad técnica en el uso de barras de acero o tubos inyectados mediante un análisis de modelos numéricos.

El software empleado para realizar la investigación fue Midas GTS NX, este permite realizar un modelado en elementos finitos tridimensional mediante el cual se representan las características del suelo y la estructura de contención ante cargas sísmicas. De igual forma, Midas GTS-NX permite realizar un análisis de tiempo historia no lineal, considerando las etapas constructivas, mostrando la variación en los desplazamientos relativos y fuerzas axiales presentes en cada anclaje para cada etapa. El comportamiento del suelo fue representado mediante el modelo constitutivo Hardening Soil.

En la Figura 3-1 se representa un diagrama de flujo, el cual muestra el proceso que se llevó a cabo durante la investigación.

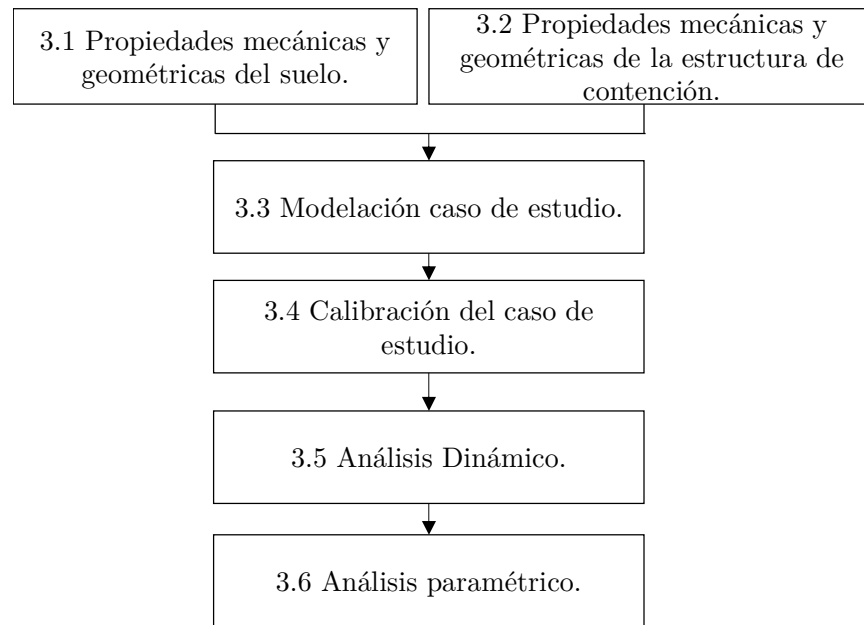


Figura 3-1: Metodología de desarrollo para el presente proyecto.

3.1 Propiedades mecánicas y geométricas del perfil del suelo

Para determinar las propiedades del suelo, se consideraron los ensayos de campo y laboratorio reportados en la tesis del ingeniero Vélez (2018) sobre un proyecto mixto de comercio y oficinas. Y como análisis complementarios, se consideraron los ensayos geofísicos de refracción y ensayos de dispersión de ondas superficiales (MASW), con el fin de caracterizar y analizar el perfil estratigráfico en función de las velocidades de onda y características del subsuelo (Vélez Velásquez, 2018).

Como resultado de los ensayos, se detectaron tres tipos de geomateriales con propiedades diferentes los cuales conformaban los estratos del perfil geológico de la siguiente manera:

- El primer estrato, tiene un espesor de aproximadamente 2,45 m, constituido por un depósito antrópico heterogéneo de gravas pobremente gradadas y fracciones de limos, además contiene restos de materiales de construcción y presencia de raíces. Se configura como una unidad antrópica estructurada debido a los cortes realizados sobre la vertiente para la ampliación y utilización del área.

- El segundo estrato, tiene un espesor de aproximadamente 15 m, está compuesto de bloques de roca heterométricos inmersos en la matriz de suelo de estructura saprolítica y con un estado de meteorización variable.
- El tercer estrato, presenta un espesor variable, compuesto de una matriz limo-arcillosa densa, caracterizado por su bajo estado de oxidación y conservación de la roca parental. Relación promedio matriz/bloques 21/79, aproximadamente.

A partir de los resultados de los sondeos exploratorios y los ensayos realizados tanto en campo como en laboratorio, en la Tabla 3-1 se presentan los parámetros establecidos por la empresa para cada estrato del perfil en estudio.

Parámetros		Unidad	Primer estrato: depósito antrópico	Segundo estrato: flujo de lodos y escombros	Tercer estrato: saprolito de anfibolita
γ	Peso unitario	kN/m ³	21	19	20
C	Cohesión	kPa	10	26	32
ϕ	Ángulo de fricción	°	24	26	35
E_{50}^{ref}	Rigidez secante en ensayo triaxial	KPa	30000	35000	35000
E_{oed}^{ref}	Rigidez tangencial en ensayo con edómetro	KPa	30000	35000	35000
E_{ur}^{ref}	Rigidez por carga / descarga	KPa	60000	70000	70000
ν	Relación de poisson	--	0,30	0,30	0,25

Tabla 3-1: Propiedades de los estratos del terreno (Modificado de: (Vélez Velásquez, 2018)).

En la figura 3-2, se puede evidenciar las condiciones del terreno original, la excavación proyectada, y la estructura de contención de muro anclado en la zona oriental.

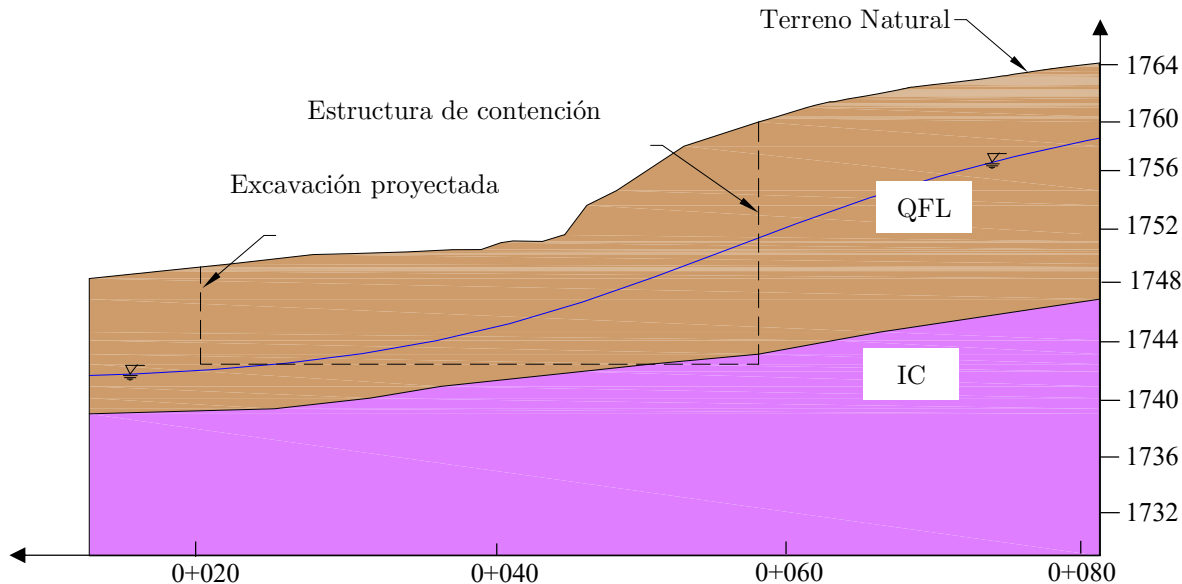


Figura 3-2: Perfil geotécnico Predominante. (modificado de (Vélez Velásquez, 2018)).

3.2 Propiedades mecánicas y geométricas de la estructura de contención

El sistema de contención analizado está compuesto de un muro apuntalado con anclajes activos (pretensados), en el cual, cada elemento posee propiedades mecánicas y geométricas específicas dadas las condiciones del terreno. La pantalla del muro continuo que conforma el sistema de contención está compuesta por concreto de 21 MPa con un espesor de 0,3 m y a una altura máxima de 20.3 m, dada por las condiciones del terreno. Para su construcción se llevó a cabo una excavación de forma vertical desde la superficie del terreno hasta un poco más de 1.5 m, distancia a la que se sitúa la primera fila de anclajes como se observa en la Figura 3-3, en la cual se presenta la distribución de los elementos en el sistema propuesto, evidenciando el posicionamiento e inclinación de los anclajes embebidos en el muro continuo.

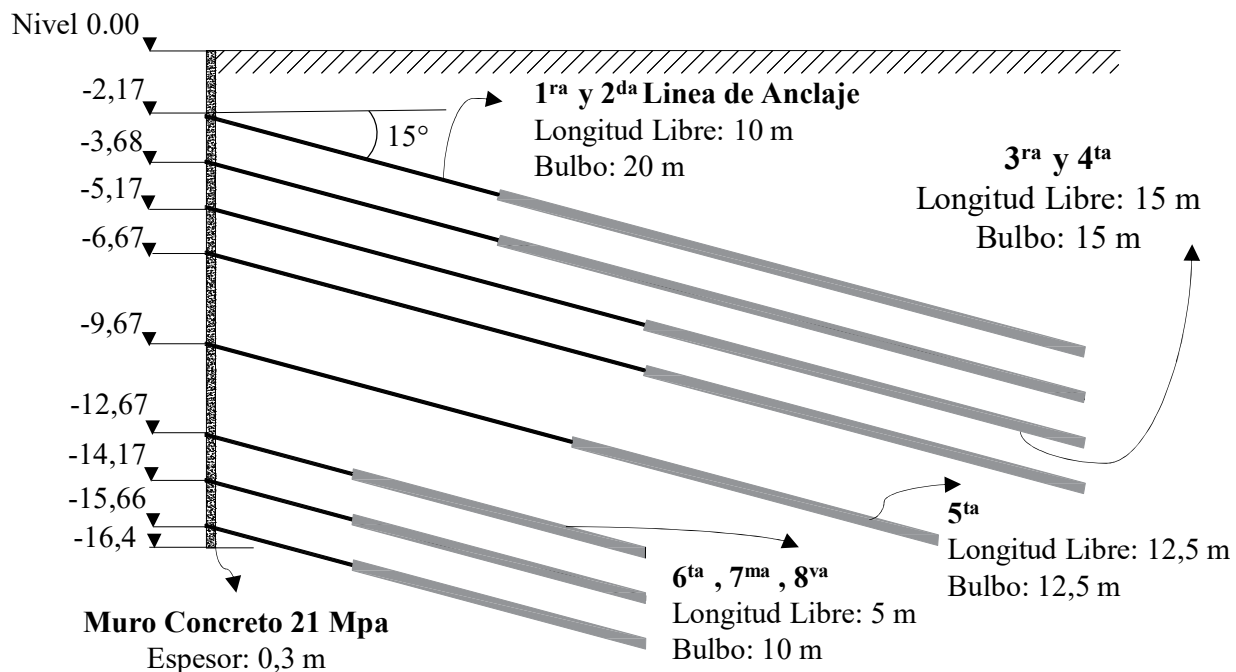


Figura 3-3: Esquema geométrico del sistema de contención mediante sistema de contención continuo de anclajes activos costado oriental.

Los anclajes del sistema de contención están compuestos por cables o por barras de alta tensión, con una zona de bulbo compuesta de lechada que se inyecta a presión y cargas de tensionamiento generalmente de la máxima magnitud prevista en el proyecto. El presente modelo, se compone de ocho (8) filas de anclajes activos, cada una con cinco (5) anclajes separados verticalmente a 1.5 m a excepción de la fila 5 cuya separación es de 3 m; y separados horizontalmente a 2 m. Cada anclaje presenta una longitud y pretensionamiento variable, como lo muestra la Tabla 3-2.

<i>Propiedades de los anclajes</i>						
<i>Filas</i>	Longitud de anclajes (m)	Longitud de bulbo (m)	Angulo de inclinación (°)	Diámetro de perforación (mm)	Diámetro del anclaje (mm)	Pretensionamiento (kN)
<i>Fila 1</i>	30	20	-15	101,6 – 4,0"	51	400
<i>Fila 2</i>	30	20				400
<i>Fila 3</i>	30	15				400
<i>Fila 4</i>	30	15				400
<i>Fila 5</i>	25	12,5				300
<i>Fila 6</i>	15	10				300
<i>Fila 7</i>	15	10				300
<i>Fila 8</i>	15	10				300

Tabla 3-2 Propiedades de los anclajes en el sistema de contención

3.3 Modelación del caso de estudio

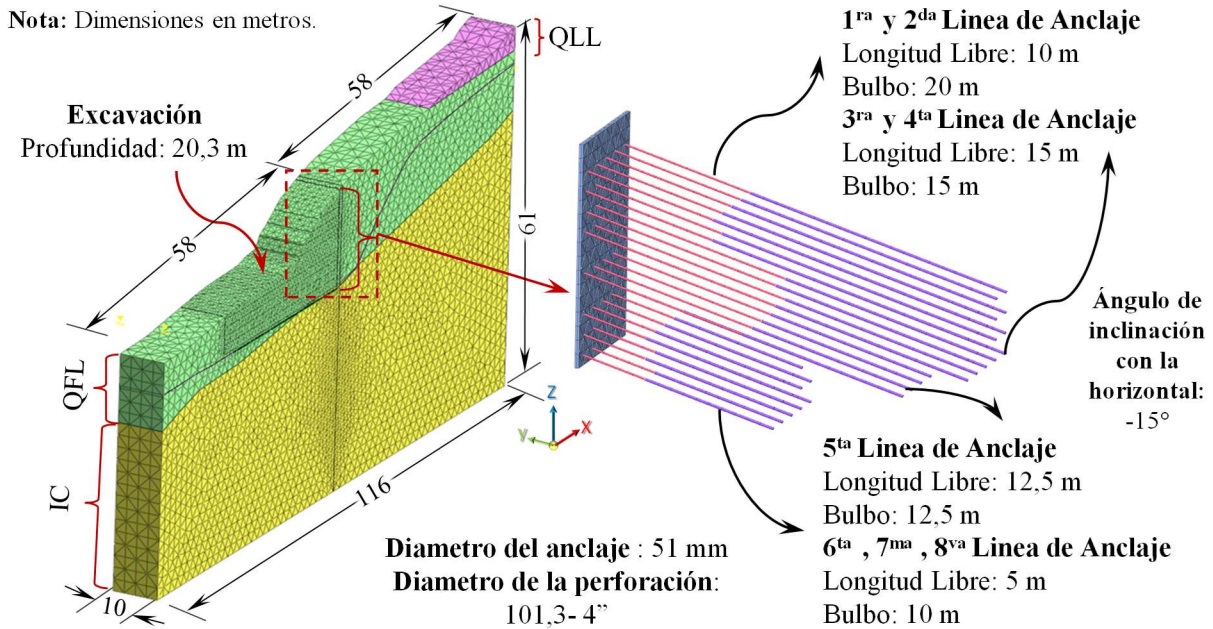


Figura 3-4: Modelación del caso de estudio mediante software midas GTS NX.

Para la modelación numérica del sistema de contención se consideró el software midas GTS NX que permite representar el suelo y la estructura de contención mediante un

modelo tridimensional (3D). El software permite realizar un análisis dinámico en el cual la forma de la función de carga variable en el tiempo y la carga estática se pueden convertir a una forma de masa para aplicar en el análisis dinámico.

La figura 3-5 Representa el sistema de trabajo manejado en el software midas GTS NX, en esta se muestran las diferentes etapas que son necesarias para la correcta modelación de la estructura. Es decir, primero se genera el modelo geométrico, luego se realiza la modelación del sistema con su enmallado, y finalmente se establecen las condiciones de frontera estáticas y dinámicas.

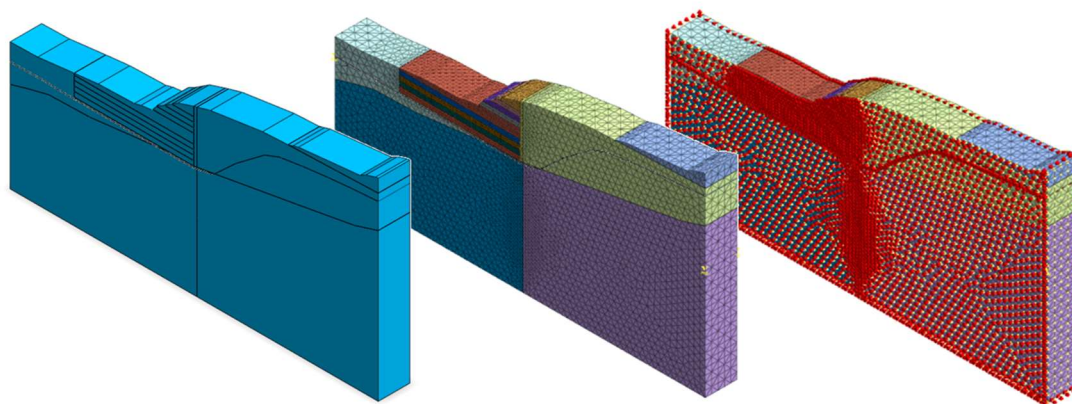


Figura 3-5: a) Modelado geométrico, b) Modelado del sistema con su enmallado y c) Modelado con sus condiciones de frontera.

Para la estructuración del modelo en el programa midas GTS NX, la interfaz del programa parte de un modelado bidimensional (2D), en el cual se definen las características del terreno, en este caso, las deposiciones y excavaciones, así como también, la estructura del sistema de contención. Con base a lo anterior, se genera un modelado tridimensional (3D), por medio de la generación de sólidos, como se evidencia en la figura 3-5a. Las dimensiones que se adoptaron en el presente caso de estudio (zona de excavación y zona de deposiciones), son las representadas en las Figuras 3-3 y 3-4

La zona de excavación está compuesta por 8 filas de anclajes distanciados cada 1.5 m verticalmente de eje a eje en cada fila con 5 columnas separadas cada 2 metros horizontalmente de eje a eje (ver Figura 3-4), para un total de 40 anclajes embebidos en el muro de concreto, conformados por diversos sólidos a diferentes profundidades de acuerdo con las etapas constructivas consideradas. Posteriormente, se crea un mallado

representativo de las superficies del terreno, definiendo sus propiedades y materiales respectivamente.

El muro fue representado por un elemento tipo Shell, que emplea un modelo constitutivo elástico - lineal que permite modelar estructuras en la que una dimensión de la estructura es significativamente menor que las otras dimensiones, en adición los esfuerzos que se presentan el plano perpendicular a la sección más débil deben ser 5 veces los esfuerzos presentados en las otras secciones. En los cables se implementó un tipo de modelo Embedded Truss, ya que se caracteriza por considerar elementos de interfaz que no requieren conexiones de nodo con elementos de tierra vecinos. Y para el caso del bulbo, se ejecutó un tipo de modelo Embedded Beam el cual se utiliza para comprobar el desplazamiento relativo y el comportamiento de la fricción entre el elemento y el suelo.

Una vez definidos los tipos de elementos en el modelo, se procede con la creación del enmallado, en este caso, se empleó un sembrado de nodos con un control de malla de 1 m en las zonas de excavación, obteniendo una cantidad de nodos representativos de estas zonas. Para el suelo, se generó un mallado triangular de 2 m para zonas de deposiciones y, para las zonas de excavaciones, se generó un mallado triangular de 1 m. El proceso de enmallado se da por terminado cuando se cumplen todos los criterios anteriormente mencionados como se muestra en Figura 3-5 b). Seguidamente, se genera una frontera que restringe los desplazamientos horizontales en los bordes laterales y la parte inferior del modelo y los desplazamientos verticales únicamente para la parte inferior del modelo. Estas limitaciones se representan como flechas de color rojo en el modelo como se puede observar en la figura 3-5 c).

Para estimar las cargas que actúan en la estructura, se representó como la gravedad al peso propio de los materiales que hacen parte del modelo, en este caso, para el modelo 3D en estudio se asume que la dirección de la carga se encuentra en el eje z ($G_z=1$). Debido a que el sistema cuenta con una serie de anclajes activos, se aplicaron las cargas de pretensionamiento indicadas en la tabla 3.2 a los cables usando la función Prestress.

Dado que no es posible modelar un terreno infinito, se aplicó un elemento de campo libre para eliminar el efecto de límite causado por la onda de reflexión. El elemento de campo libre permite aplicar la tracción resultante del análisis de campo libre al límite del suelo y luego, eliminar la onda de reflexión utilizando la condición de límite absorbente. Para ello, se seleccionan los bordes laterales del elemento y se genera una nueva malla mediante

la función Free Field. Una vez se genera la nueva malla, se debe fijar con el fin de restringir los desplazamientos que se puedan presentar en las distintas direcciones dado que se trata de un modelo tridimensional (3D), por lo cual, se crea una condición de frontera seleccionando el borde inferior del modelo, con la precaución de no seleccionar puntos de las mallas creadas anteriormente.

Se creó una malla de resorte de superficie de suelo la cual generó un elemento límite de amortiguamiento que absorbe la onda permitiendo que este viajara libremente, mediante la opción Ground Surface Spring Damping se creó automáticamente los elementos de contorno elásticos/viscosos necesarios para el análisis dinámico, generando condiciones de contorno a la izquierda/derecha/piso de la malla seleccionada y el resorte. Los parámetros son las propiedades físicas del suelo que se ingresan durante el modelado, el módulo de volumen y el módulo de corte se calculan utilizando el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, por lo anterior, no es necesario ingresar valores adicionales al crear un elemento de límite viscoso, el resorte se crea automáticamente al considerar el área del elemento (longitud efectiva * unidad de ancho).

Una vez definido el mallado del modelo, con las restricciones que requiere y la consideración de cargas que actúan en la estructura, se procede a definir el tipo de sistema constructivo que se empleará. En este estudio se empleó el Stress-Nolinear Time History, considerando un análisis de esfuerzo de tiempo historia no linear. En la tabla 3-3 se presenta la descripción detallada de cada etapa de construcción considerada para la estructuración del modelo y así conocer el comportamiento de los elementos que componen el sistema hasta su última etapa.

<i>Etapa</i>	<i>Nombre</i>	<i>Prof. (z)</i>	<i>Descripción de la etapa</i>
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	Nula	0 m	Se reestablecen los desplazamientos.
3	Excv. 1	-0,75 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del primer nivel de anclaje. Se Activa malla de excavación 1.
4	Ancl. 1	-1,5 m	Instalación del primer nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto desde el nivel de excavación, hasta 0,75 m, Se activan mallas correspondientes al cable 1, bulbo 1 y muro 1.
5	Pret. 1	-3,0 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del primer nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #1.
6	Excv. 2	-3,0 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del segundo nivel de anclaje
7	Ancl. 2	-3,75 m	Instalación del segundo nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 2, bulbo 2 y muro 2.
8	Pret. 2	-4,5 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del segundo nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #2.
9	Excv. 3	-4,5 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del tercer nivel de anclaje
10	Ancl. 3	-5,25 m	Instalación del tercer nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 3, bulbo 3 y muro 3.
11	Pret. 3	-6,0 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del tercer nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #3.
12	Excv. 4	-6,0 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del cuarto nivel de anclaje
13	Ancl. 4	-6,75 m	Instalación del cuarto nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 4, bulbo 4 y muro 4.
14	Pret. 4	-7,5 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del cuarto nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #4.
15	Excv. 5	-7,5 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del quinto nivel de anclaje
16	Ancl. 5	-9,75 m	Instalación del quinto nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 5, bulbo 5 y muro 5.
17	Pret. 5	-10,5 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del quinto nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #5.
18	Excv. 6	-10,5 m	Excavación hasta 2,0 m debajo de la cota del quinto nivel de anclaje. Se activa malla d excavación 6.

19	Vaciado Pantalla	-12,0 m	Vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación. Se activa malla de Muros.
20	Excav. 7	-12,0 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del sexto nivel de anclaje
21	Ancl. 6	-12,75 m	Instalación del sexto nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 6, bulbo 6 y muro 6.
22	Pret. 6	-13,5 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del sexto nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #6.
23	Excav. 8	-13,5 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del séptimo nivel de anclaje
24	Ancl. 7	-14,25 m	Instalación del séptimo nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 7, bulbo 7 y muro 7.
25	Pret. 7	-15,0 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del sexto nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #7.
26	Excav. 9	-15,75 m	Excavación hasta 0,75 m debajo de la cota del octavo nivel de anclaje
27	Ancl. 8	-16,5 m	Instalación del octavo nivel de anclaje y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación Se activan mallas correspondientes al cable 8, bulbo 8 y muro 8.
28	Pret 8	-16,5 m	Instalación de platinas y pretensionamiento del octavo nivel de anclaje. Se activa pretensionamiento Anclaje #8.

Tabla 3-3: Sistema Constructivo implementado para el caso de estudio.

3.4 Calibración del caso de estudio

La calibración consistió en la implementación del modelo en el software Midas GTS NX, en el cual, por medio del desarrollo del análisis por etapas del sistema de contención, se valida el funcionamiento, comparando los resultados de los desplazamientos laterales del muro arrojados por el software, con los resultados de los registros de las deformaciones mostradas por los inclinómetros instalados en campo y cuyos datos se obtuvieron de la tesis del ingeniero Pablo Vélez (Vélez Velásquez, 2018). Para la calibración del modelo fue considerada las deformaciones registradas por el inclinómetro I-01.

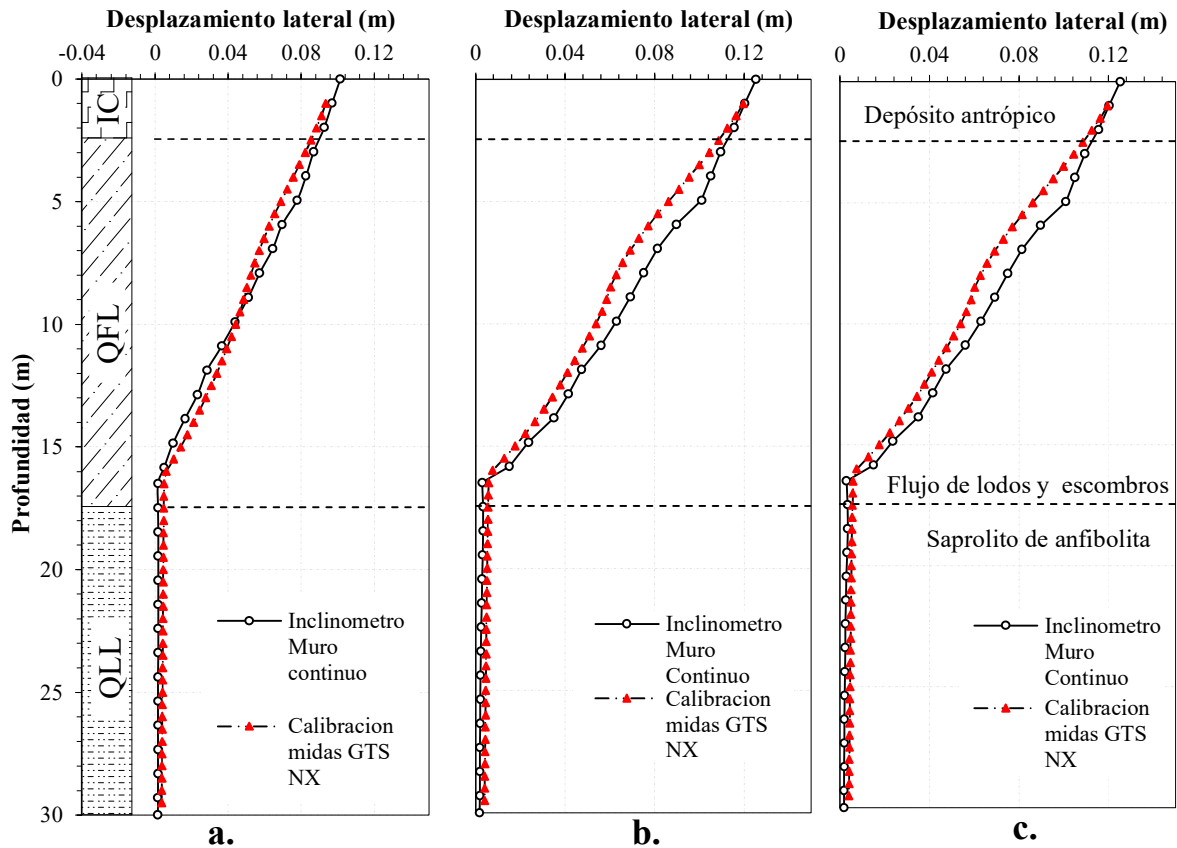


Figura 3-6: Deformaciones registradas para **a.** Etapa 19 (Vaciado de concreto), **b.** Etapa 24 (Instalación de anclaje y vaciado de concreto), **c.** Etapa 27(Instalación de platinas y pretensionamiento).

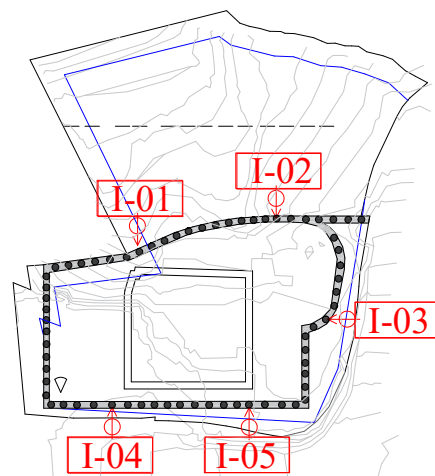


Figura 3-7: Localización de inclinómetros instalados para el registro de las deformaciones Modificado de:(Vélez Velásquez, 2018).

Inclinómetro	Profundidad (m)
I-01	30,0
I-02	30,0
I-03	20,0
I-04	21,0
I-05	21,0

Tabla 3-4: Profundidad alcanzada por los inclinómetros instalados. Tomado de: (Velásquez, 2018).

Como se evidencia en la figura 3-6, se garantizó que los registros en campo “Inclinómetro muro continuo” y los resultados de la modelación “Calibración midas GTS NX” fueran similares para las etapas más importantes en el proceso constructivo del sistema de contención, como lo son las etapas de vaciado de pantalla, pretensionamiento de anclajes y de finalización del muro, lo que significa que el modelo realizado en el software representa de manera adecuada el comportamiento real del sistema de contención.

3.5 *Análisis Dinámico*

Para realizar el análisis dinámico del sistema de contención, se parte del modelo previamente calibrado para condiciones estáticas, realizando un análisis de Eigenvalue a las propiedades dinámicas inherentes del suelo/estructura con el cual se puede obtener el modo natural (forma modal), el periodo natural (frecuencia natural), el factor de participación modal, entre otros.

El factor de participación de masa es fundamental ya que representa cuánto porcentaje de la estructura participa en la vibración para cada modo, por lo tanto, los dos modos con mayor porcentaje de participación de masa son los considerados para el análisis de las ondas sísmicas. Cabe resaltar que las propiedades de los materiales del suelo son relativamente menores que las propiedades estructurales, por lo que es difícil tener un factor de participación de masa del 90% (MidaSoft, 2019).

Una vez ejecutado el análisis de valores propios, se determinan los dos modos con mayor participación de masa, con el fin de considerarlos en la amortiguación del sistema, ya que las estructuras reales no pueden vibrar infinitamente y la pérdida de energía en la estructura debido a la interacción entre los elementos que la componen disminuye gradualmente las vibraciones (MidaSoft, 2019).

Teniendo en cuenta que la mayoría de los materiales del suelo tienen propiedades no lineales, posteriormente se procedió a realizar un análisis de tiempo historia no lineal por medio de etapas constructivas ya que, por medio de este, la respuesta dinámica del suelo se puede simular con precisión. Para esto iniciamos ingresando la señal mediante la opción “Ground acceleration” (la señal fue representada a través de acelerogramas sintéticos según lo presentado en la sección 3.5.1 y 3.5.2).

3.5.1 Acelerogramas sintéticos

Para el análisis dinámico del modelo es importante utilizar una señal como representación del sismo actuante en la estructura. Con el fin de cumplir lo anteriormente mencionado, se generaron acelerogramas que consisten en registros de las aceleraciones producidas por los movimientos del suelo.

Con el fin de implementar una señal que se ajustara a las frecuencias de interés, se generaron acelerogramas sintéticos mediante una herramienta que permite obtener señales que consiguen con precisión la respuesta de la estructura frente a un sismo, en este caso, se utilizó el programa Acelsin, partiendo de los valores del espectro de diseño Figura 3-9.

Acelsin es un software que genera acelerogramas sintéticos ajustados a espectros y funciones de intensidad predefinidas (Zapata Agudelo, 2014). El método usado por el programa para generar acelerogramas se basa en la posibilidad de expandir la aceleración $\ddot{x}(t)$ de la señal sísmica en una serie de ondas sinusoidales:

$$\ddot{x}(t) = I(t) \sum_{i=1}^n A_i * \sin(w_i * t + \phi_i) \quad Ec. 3 - 1$$

donde ϕ_i , w_i y A_i son un conjunto de ángulos de fase, frecuencias y amplitudes respectivamente. $I(t)$ es una función de intensidad envolvente, determinista, predefinida y que permite simular el carácter transitorio de los acelerogramas. Se consideró la función de intensidad trapezoidal, en este caso la función, está definida por la duración de la señal, el tiempo de inicio de la parte ascendente del trapecio y la duración efectiva.

De acuerdo con dicho método, el algoritmo de generación de acelerogramas sintéticos comienza por fijar un número n de frecuencias w_i , equi-espaciadas en el rango de interés, de manera que el registro contenga todo el rango de frecuencias deseado. Seguidamente se genera de manera aleatoria el mismo número n de ángulos de fase ϕ_i , con valores entre 0 y 2Π , que dan a la señal el carácter estocástico (Zapata Agudelo, 2014).

El paso inicial para crear el nuevo proyecto en el programa es ingresar el espectro de diseño, seguidamente se establecen las tres funciones de intensidad envolvente trapezoidal de acuerdo con la duración de las señales planteadas (20,40 y 60 segundos) y a partir de estos parámetros, se generan los acelerogramas para una frecuencia determinada.

3.5.2 Espectro de diseño Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá

El espectro de diseño empleado en el presente proyecto se basó en la microzonificación sísmica del municipio de Medellín, en la cual se estimaron unas zonas homogéneas de acuerdo con las propiedades del suelo y se establecieron coeficientes espectrales para cada una de ellas. Según la ubicación del sistema de contención, se usaron los coeficientes espectrales de la zona homogénea 13.

Para la obtención del espectro de diseño de la zona homogénea 13 se usaron las ecuaciones planteadas en la microzonificación Figura 3-8.

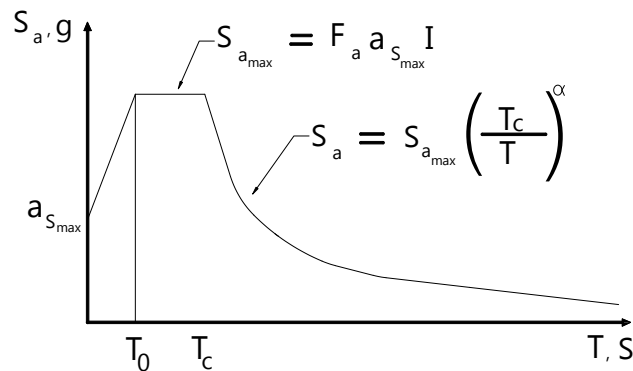


Figura 3-8: Ecuaciones espectro de diseño según microzonificación sísmica del municipio de Medellín Tomado de: (Alcaldía de Medellín Municipio de Medellín , 2011).

$$S_{a_{max}} = F_a a_{S_{max}} I \quad Ec. 3 - 2$$

$$S_a = S_{a_{max}} \left(\frac{T_c}{T}\right)^\alpha \quad Ec. 3 - 3$$

Después de reemplazados los coeficientes en las ecuaciones planteadas en la microzonificación sísmica, se obtiene el espectro de diseño tal y como lo muestra la figura 3-9.

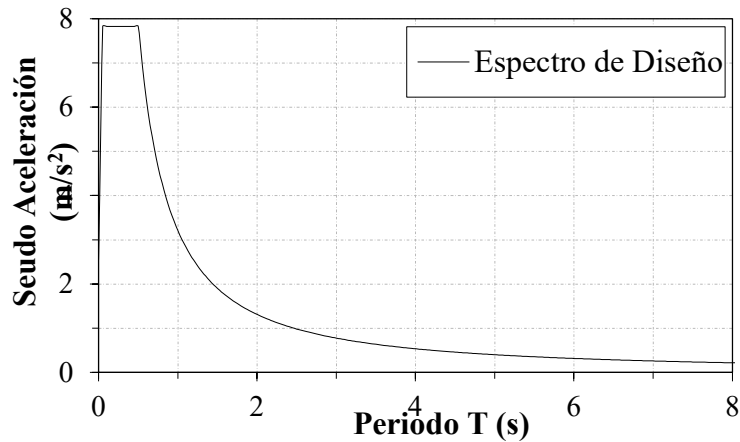


Figura 3-9: Espectro de diseño, zona homogénea 13, microzonificación sísmica Valle de Aburrá.

De acuerdo con lo comentado en el numeral 3.5.1, una vez obtenido el espectro de diseño, este es ingresado en el programa Acelsin, y posteriormente de definidos los parámetros de duración, intensidad y frecuencia, se obtienen los acelerogramas sintéticos como lo muestra la figura 3-10.

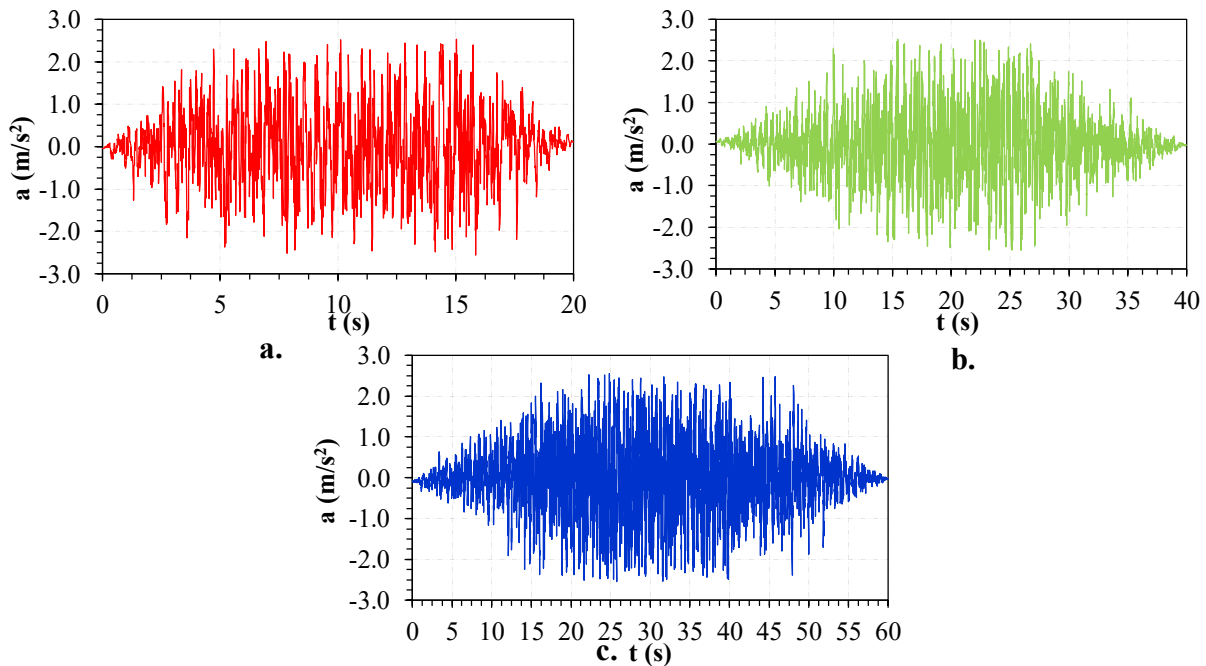


Figura 3-10: Acelerogramas sintéticos para a. 20, b. 40 y c. 60 segundos con frecuencia de muestreo 100 Hz.

Con el fin de comprobar que el comportamiento de los acelerogramas obtenidos en Acelsin estuvieran de acuerdo con las condiciones reales de la zona de sismo, se verifica el ajuste de los espectros de respuesta al espectro de diseño como lo muestra la figura 3-11.

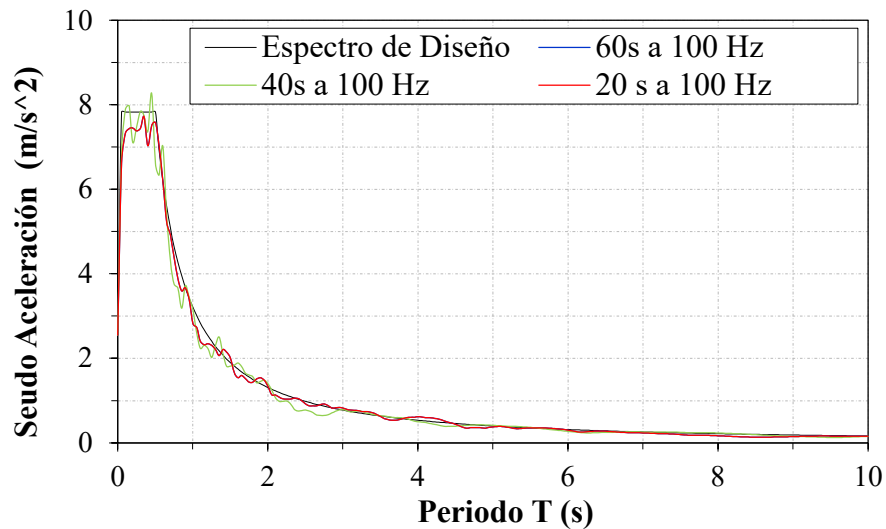


Figura 3-11: Espectros de Respuesta de acelerogramas sintéticos para señales de 20, 40 y 60 segundos basados en el espectro de diseño.

3.5.3 Transformada rápida de Fourier

Con el fin de verificar la similitud del contenido frecuencial de cada uno de los tres sismos sintéticos generados en el programa Acelsin, se aplica la transformada rápida de Fourier, un análisis que permite pasar una señal temporal, en este caso la señal del sismo, de un dominio de tiempo a un dominio de frecuencia, descomponiendo la señal original en una serie de senos y cosenos, que, al superponerse, reproducen la señal original. Como resultado de este seccionamiento en ondas simples, se obtienen valores de frecuencia y amplitud para cada una de las longitudes de onda analizadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT), y se halló similitud en el contenido frecuencial de las tres señales como lo muestra la figura 3-12, evidenciándose así que las señales son representativas.

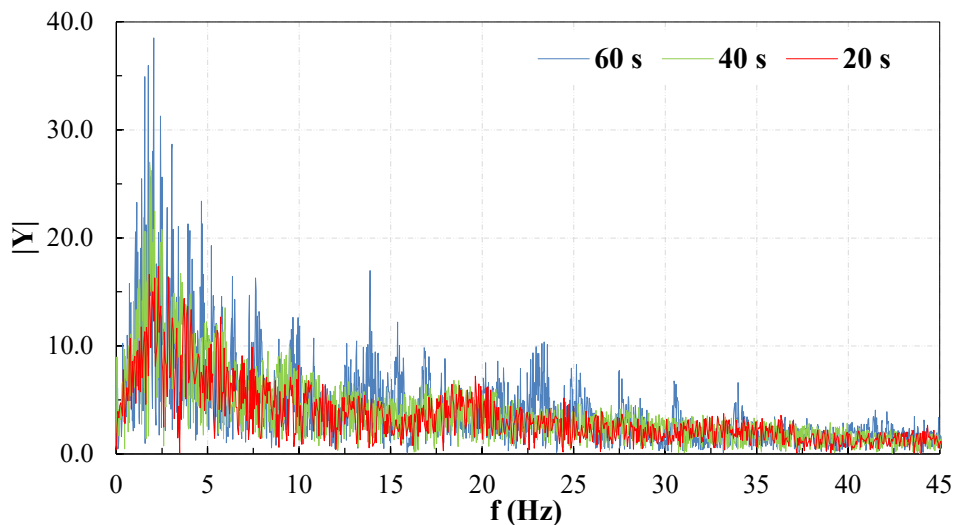


Figura 3-12: Transformada rápida de Fourier para una Frecuencia de muestreo de 100 Hz señales de 20,40 y 60 s figura 3-12.

3.6 Análisis paramétrico

En el presente proyecto se desea determinar la influencia que tiene la duración de las señales, en el comportamiento del sistema de contención, cuando este, presenta fallas parciales en alguno de los elementos. En consecuencia, se evaluará la influencia de la falla de un anclaje dentro del sistema de retención en los desplazamientos relativos y fuerzas axiales del muro, cuando el sistema es sometido a sismos con diferentes duraciones.

Se propone realizar un análisis dinámico usando los sismos sintéticos obtenidos en el numeral 3.5.2, correspondientes a duraciones de 20s, 40s y 60s respectivamente, para así determinar la influencia que tiene cada una de las señales en la estructura y como se ve afectada por las variaciones en la duración.

Subcaso	Señales
A	20 s
B	40 s
C	60 s

Tabla 3-5: Casos de análisis evaluando el sistema con todos los anclajes.

Además de la variación de la señal, se propone realizar un análisis dinámico simulando la falla de diferentes anclajes para evaluar el comportamiento de la estructura ante esta situación y así evidenciar los empujes aportados por el elemento. Para esto, se simuló la

falla de anclajes eliminando el bulbo y cable en el modelo calibrado, tal y como se muestra en la Tabla 3-6.

Caso análisis	Tiempo del acelerograma (s)	Falla en el sistema de anclajes (si/no)	Anclaje faltante
C1-A	20	No	--
C1-B	40		
C1-C	60		
C2-A	20	Si	Sin Anclaje 23
C2-B	40		
C2-C	60		
C3-A	20	Si	Sin Anclajes 23 y 24
C3-B	40		
C3-C	60		
C4-A	20	Si	Sin Anclaje 3
C4-B	40		
C4-C	60		
C5-A	20	Si	Sin Anclaje 38
C5-B	40		
C5-C	60		

Tabla 3-6: Casos de análisis evaluando el sistema con fallas parciales de los anclajes.

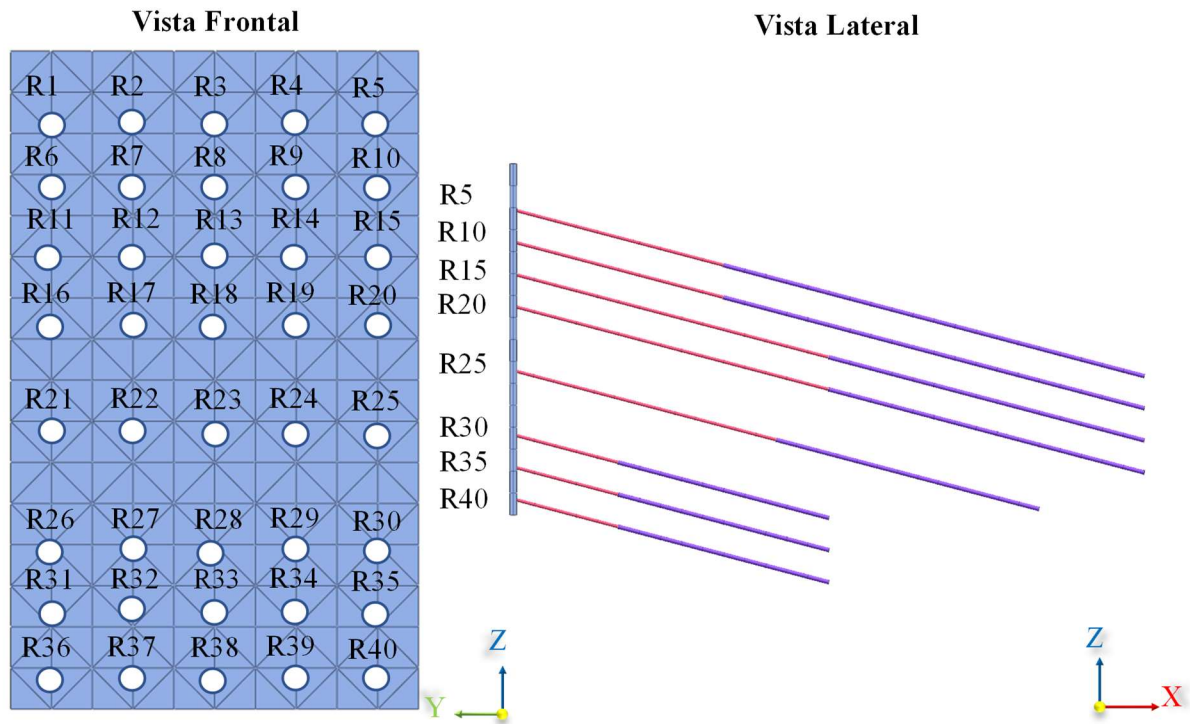


Figura 3-13: Nomenclatura de anclajes.

3.6.1 Caso 1

En este caso se analizará el sistema de contención contemplando la presencia de todos los anclajes sin simular falla en alguno de los elementos, esto con el fin de obtener resultados del comportamiento dinámico del sistema de contención ante las diferentes duraciones del sismo planteadas. Las figuras 3-14, 3-15, 3-16 presentan los desplazamientos relativos, las fuerzas axiales y los esfuerzos cortantes que actúan en el sistema de contención para los tres tiempos determinados.

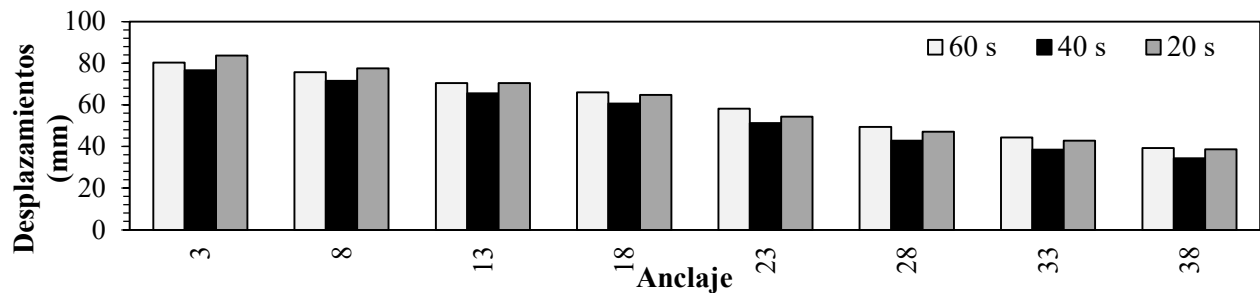


Figura 3-14: Comparación desplazamientos relativos para señales de duración de 20s, 40s y 60s.

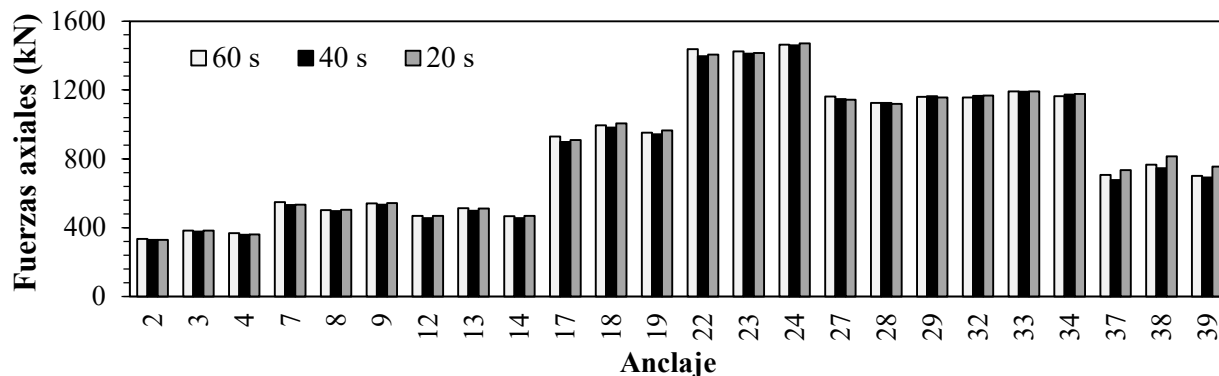
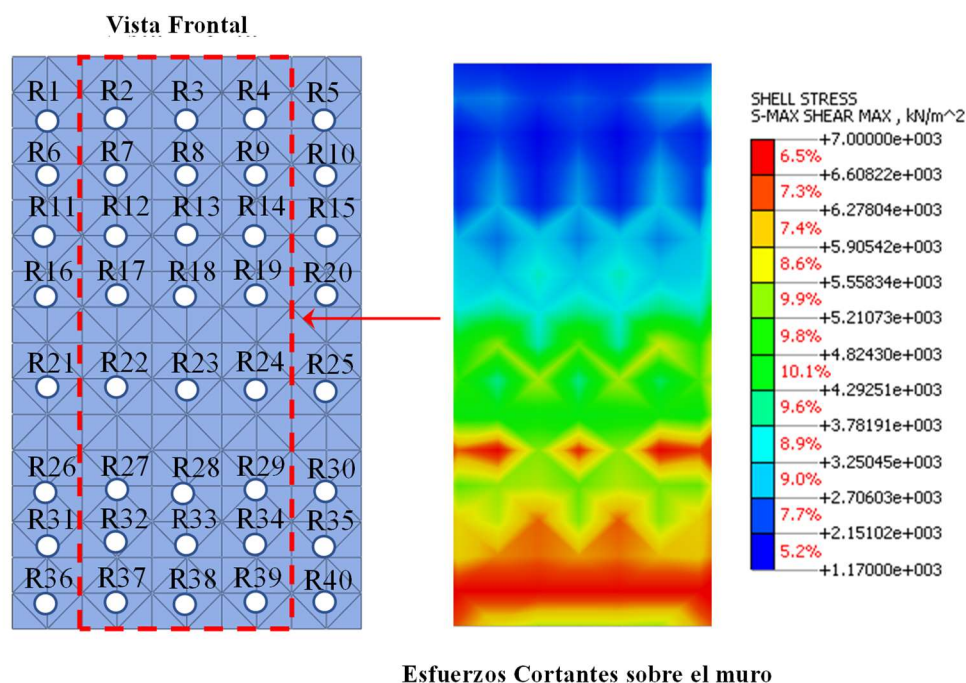


Figura 3-15: Fuerzas axiales (kN) para sismos con intensidad de 20s, 40s y 60s.



Esfuerzos Cortantes sobre el muro

Figura 3-16: Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 1).

3.6.2 Caso 2

En el presente caso, se evaluará la incidencia de la falla del anclaje nombrado como R23 (ver figura 3-16), el cual es escogido de forma estratégica, ya que su ubicación es predominante en cuanto a las fuerzas axiales teniendo en cuenta que es uno de los elementos con mayor área aferente, y a su vez, con mayor carga axial según lo presentado en la figura 3-15. En las Figuras 3-17, 3-18 y 3-19, se observan los resultados para los desplazamientos relativos, cargas axiales y esfuerzos cortantes encontrados por el sistema

para el caso en mención.

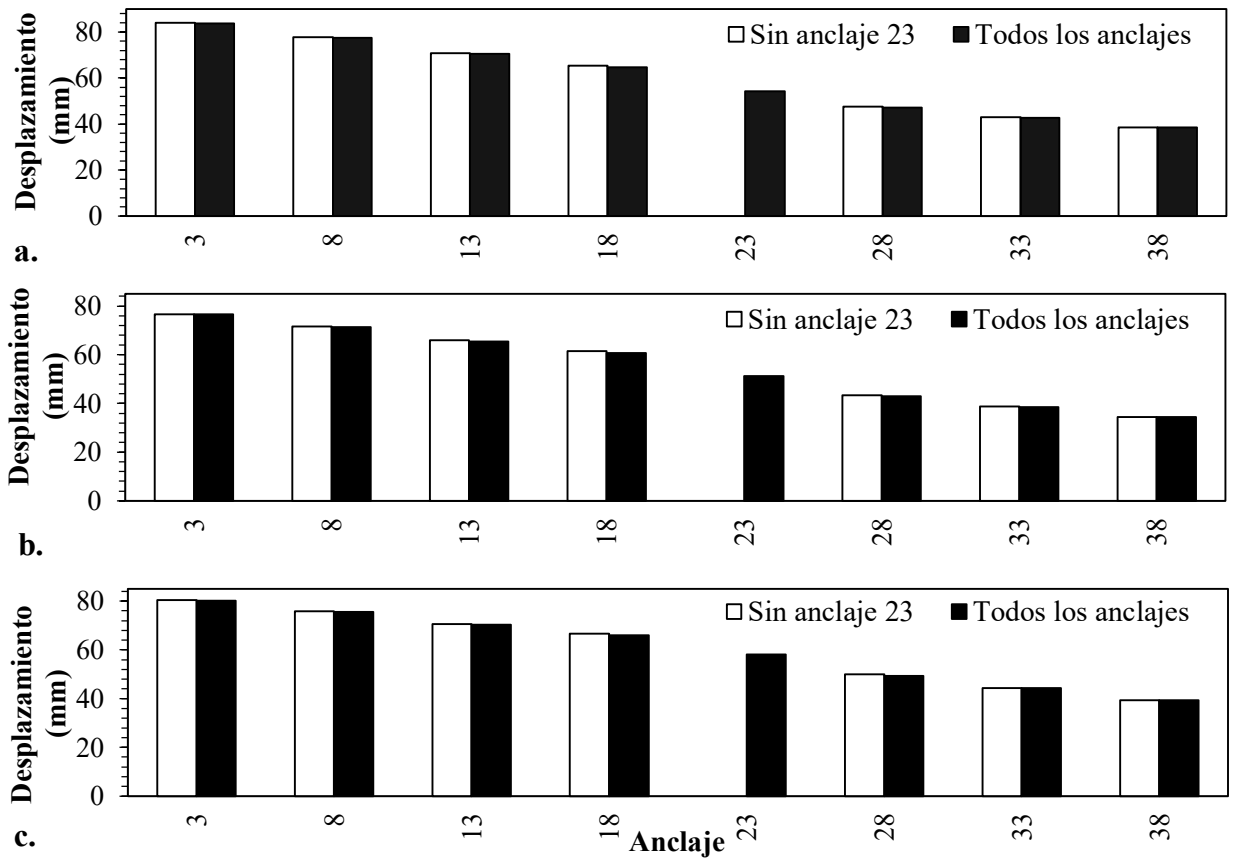


Figura 3-17: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 2) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.

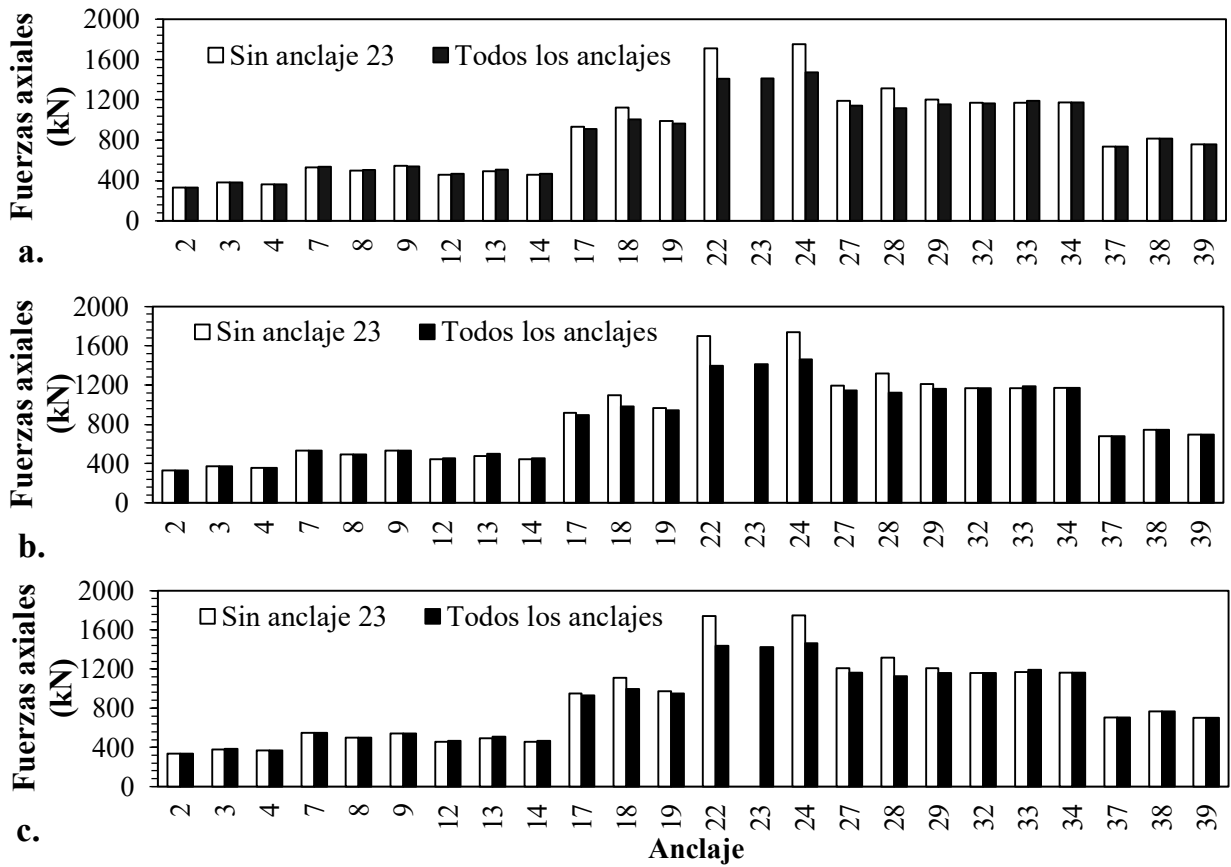


Figura 3-18: Fuerzas axiales (kN) (Caso 2) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.

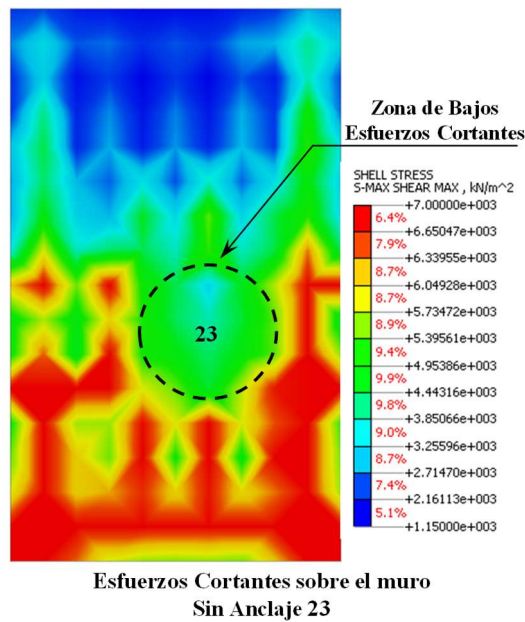


Figura 3-19: Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 2).

3.6.3 Caso 3

En el presente caso, se analizará la incidencia de la falla de dos anclajes contiguos de manera horizontal, por lo cual son elegidos los anclajes “R23” y “R24”, los cuales son importantes en el sistema ya que asumen las mayores fuerzas axiales. En las figuras 3-20, 3-21 y 3-22, se presentan los resultados para desplazamientos relativos, fuerzas axiales y esfuerzos cortantes encontrados para el caso en mención.

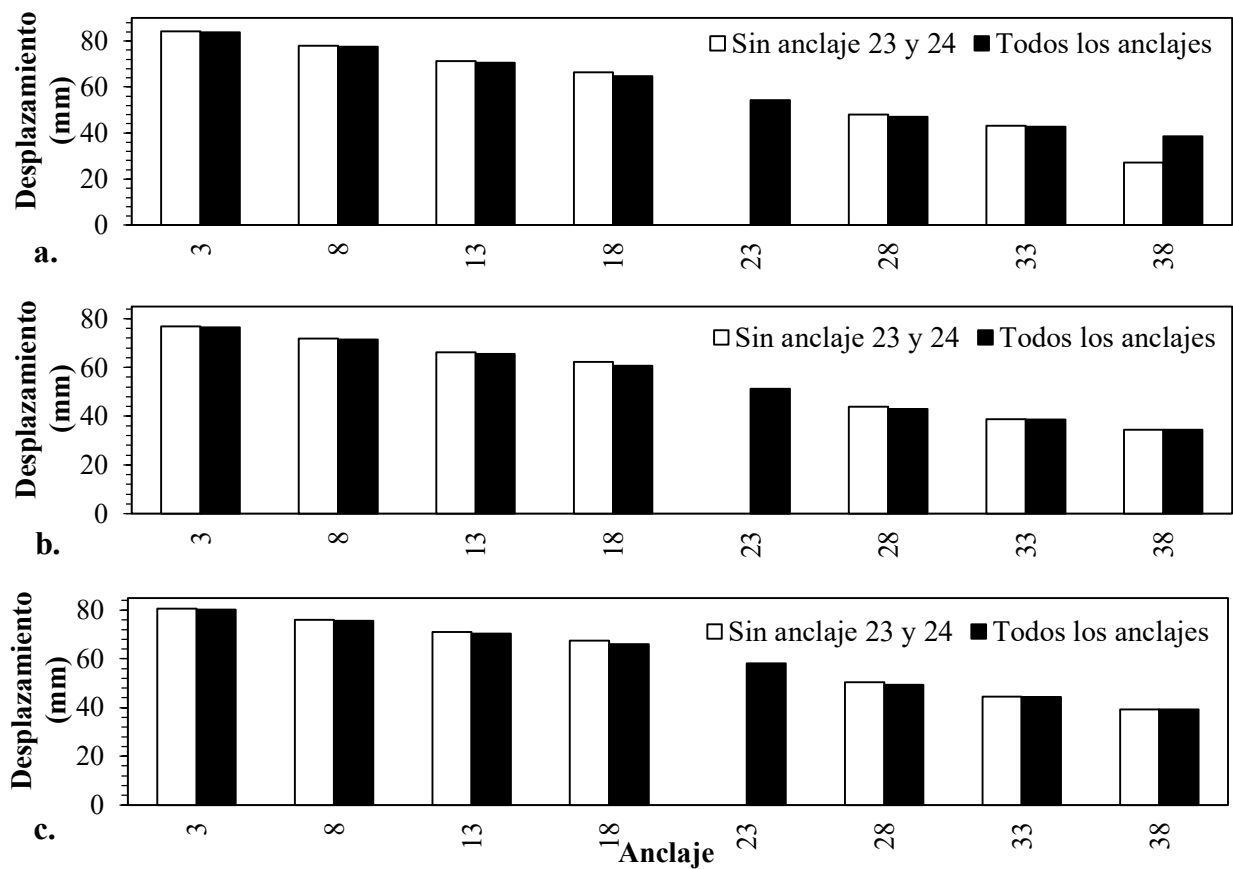


Figura 3-20: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 3) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.

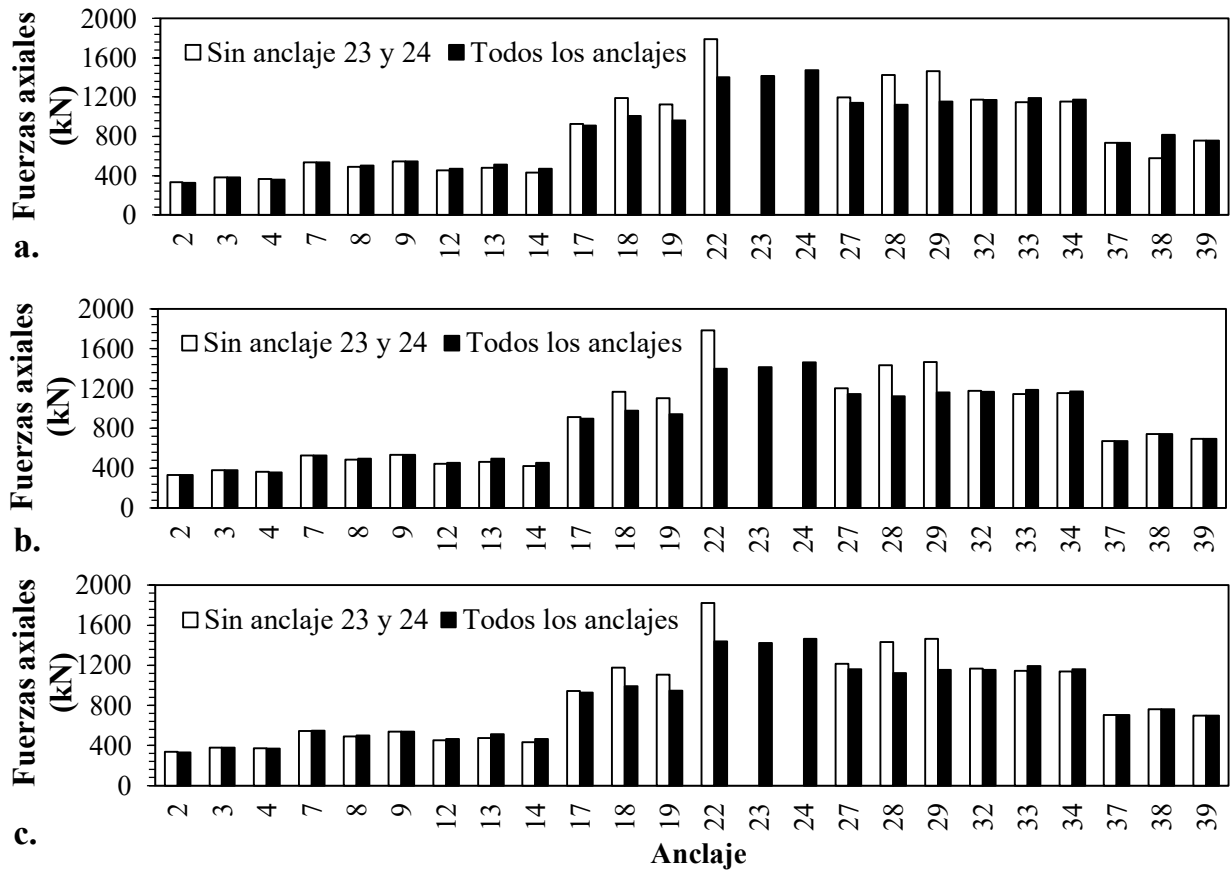


Figura 3-21 : Fuerzas axiales (kN) (Caso 3) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.

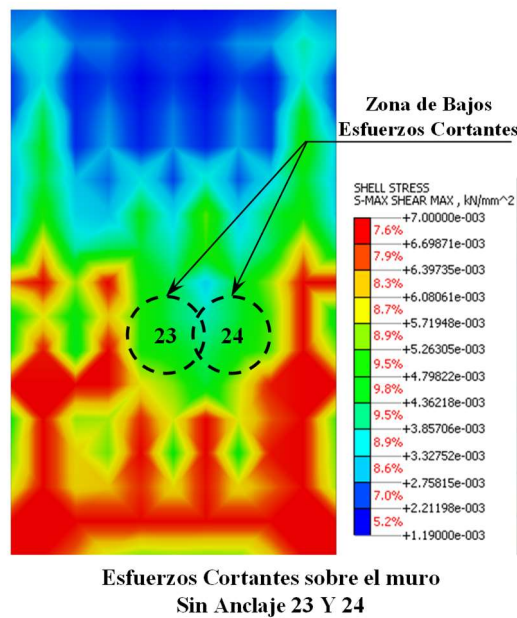


Figura 3-22 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 3).

3.6.4 Caso 4

En el presente caso se elige como anclaje a fallar el “R3”, debido a que en la parte superior del sistema se presentan los mayores desplazamientos relativos, y se desea evaluar la incidencia de este anclaje en los desplazamientos del sistema. En las figuras 3-23, 3-24 y 3-25, se presentan los resultados para desplazamientos relativos, fuerzas axiales y esfuerzos cortantes encontrados para el caso en mención.

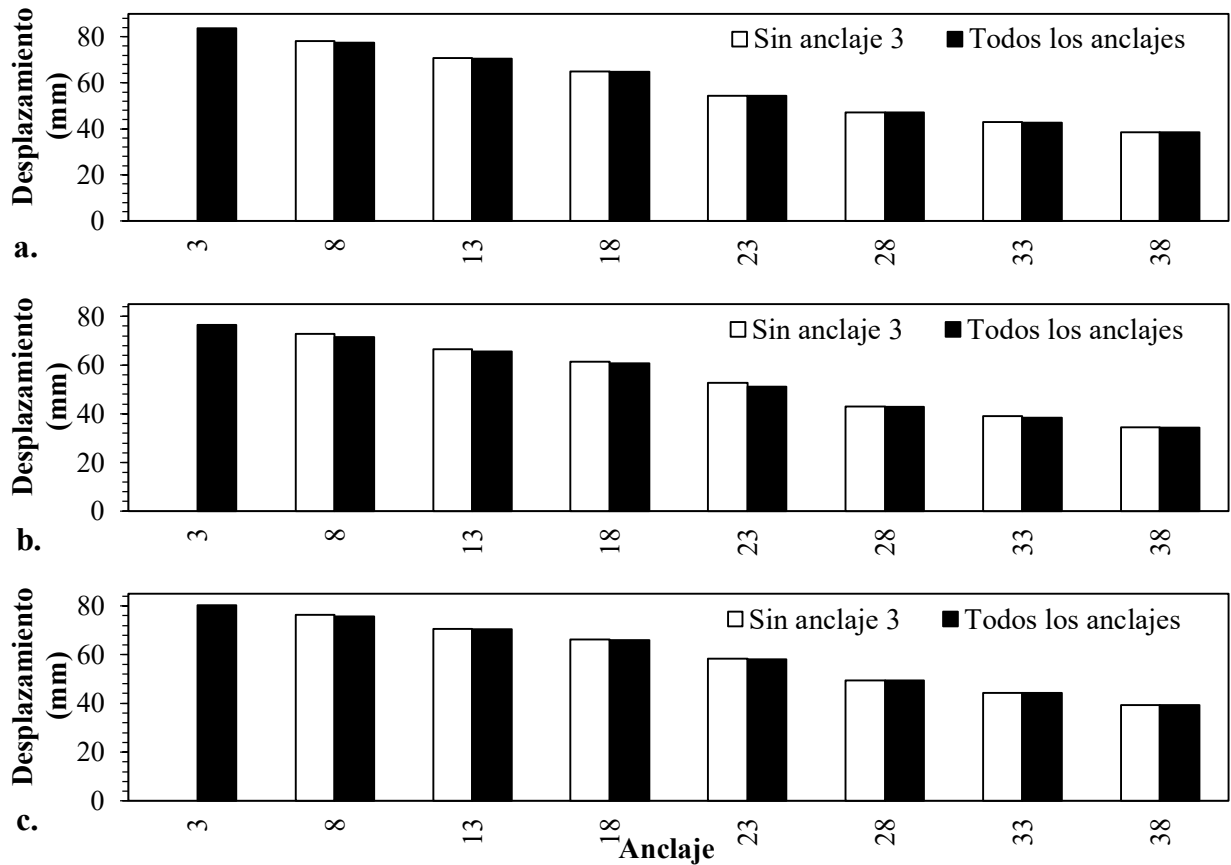


Figura 3-23: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 4) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.

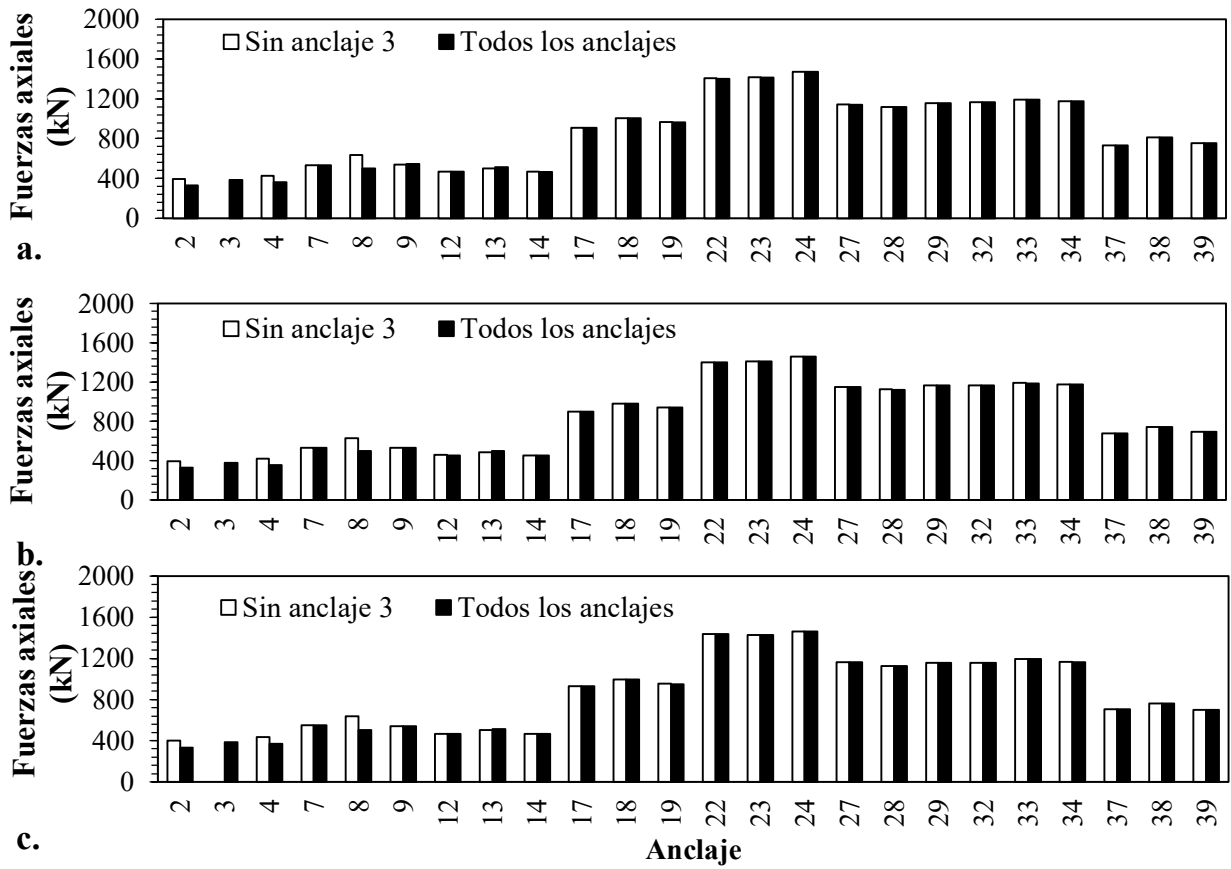


Figura 3-24 : Fuerzas axiales (kN) (Caso 4) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.

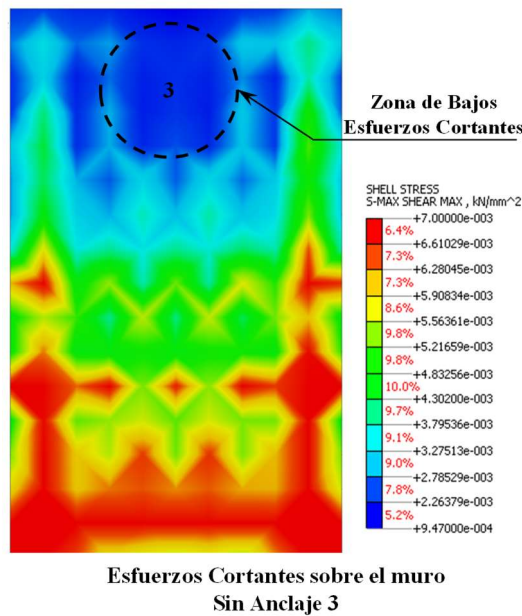


Figura 3-25 : Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 4).

3.6.5 Caso 5

Se finaliza con las variaciones en el caso 5, en el cual se analizará el comportamiento dinámico del anclaje “R38” ubicado en la fila intermedia del sistema de contención. En las figuras 3-26 a 3-28, se presentan los resultados para desplazamientos relativos, fuerzas axiales y esfuerzos cortantes encontrados para el caso en mención.

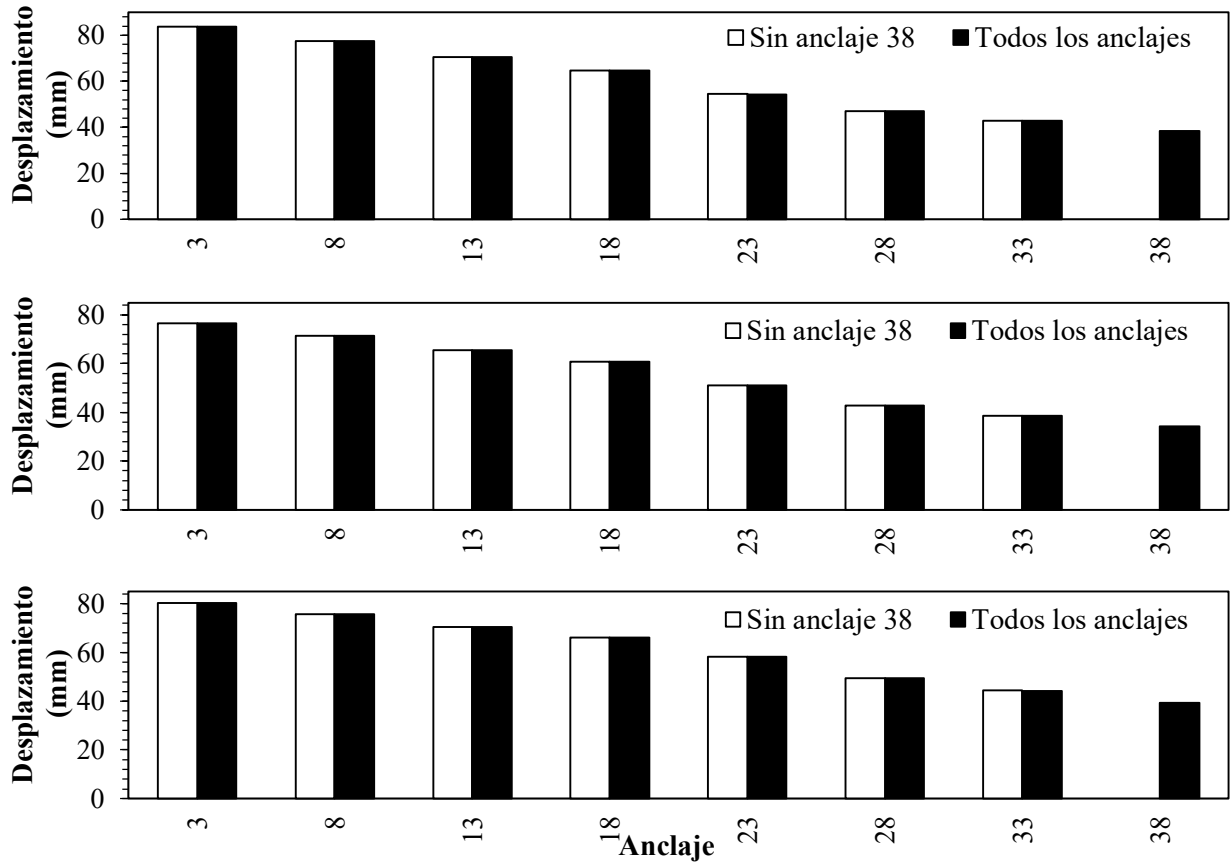


Figura 3-26: Desplazamientos relativos Columna intermedia (Caso 5) para señales de duración de a. 20s, b.40s y c.60s.

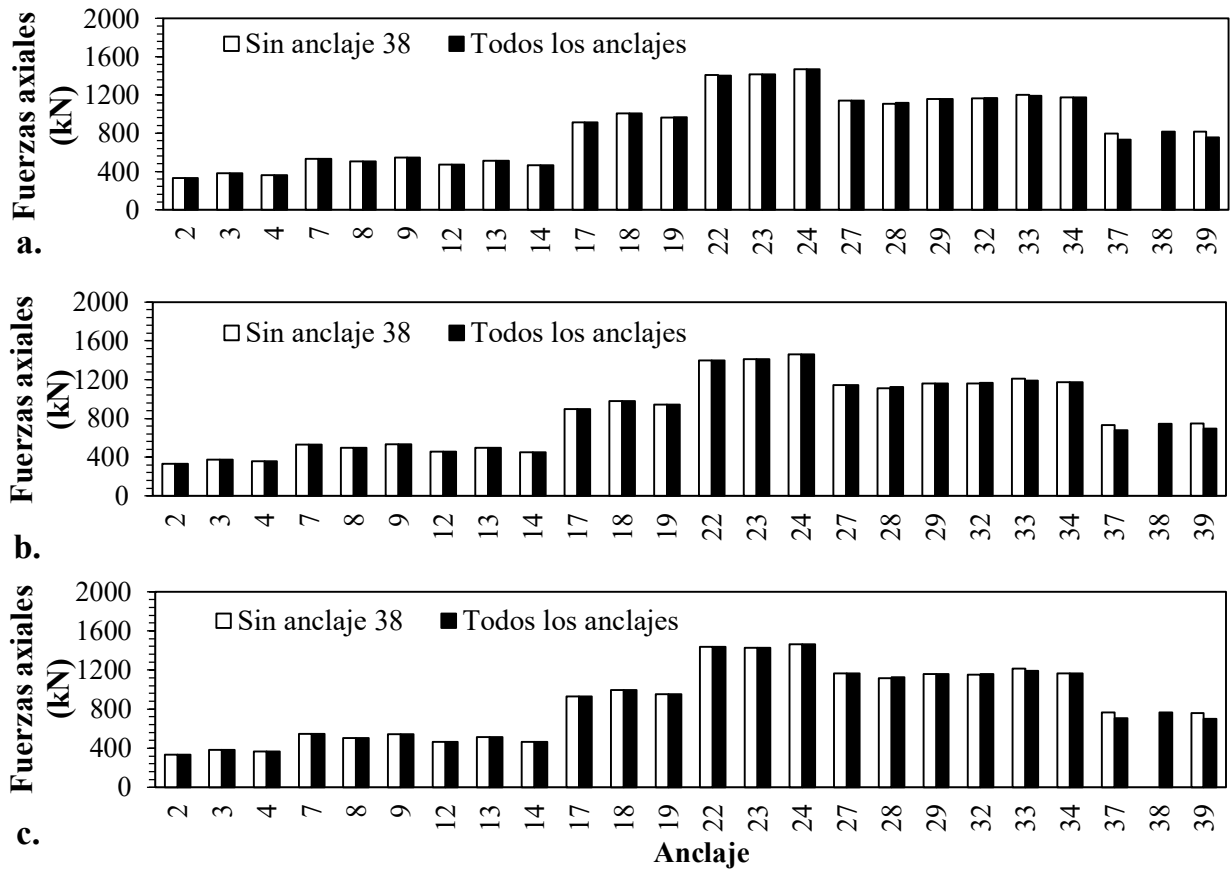


Figura 3-27: Fuerzas axiales (kN) (Caso 5) para sismos con duración de a.20s, b.40s y c.60s.

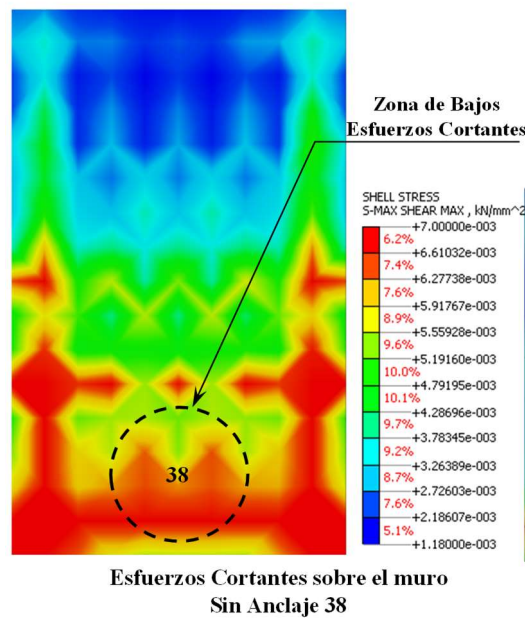


Figura 3-28: Distribución esfuerzos cortantes sobre muro de contención (Caso 5).

Capítulo 4

4. Análisis de resultados

Una vez realizado el análisis dinámico para los casos propuestos en el análisis paramétrico, se generaron diferentes resultados, siendo de especial interés, los relacionados con las fuerzas axiales y desplazamientos que actúan en la estructura. Los datos obtenidos se representaron mediante gráficas y diagramas, a los cuales se les realizó un análisis según se evidencio su comportamiento. A continuación, se presentan el análisis de resultados de cada caso.

4.1 Resultados modelación numérica

4.1.1 Caso 1

En la figura 3-14 se registran los mayores desplazamientos relativos de la columna intermedia del sistema de contención para una señal de 20,40 y 60 segundos, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz, en esta se puede evidenciar que la duración de la señal tiene una incidencia mínima en la estabilidad del sistema, ya que para los tres tiempos el comportamiento de los desplazamientos y fuerzas tuvo un comportamiento similar y no se generaron diferencias significativas en los valores máximos; de igual manera, se observa que los desplazamientos relativos se iban haciendo mayores a medida que se iba ascendiendo por el muro evidenciando una repercusión en los anclajes superiores, ya que, para todas las duraciones del sismo, el anclaje R3 obtiene los mayores desplazamientos. Según lo anterior, los menores desplazamientos se encuentran en los anclajes inferiores, siendo el anclaje R38 el que tiene el menor desplazamiento.

Como se puede observar en la figura A-1 del anexo A, para la señal de 40 segundos el anclaje R3 sigue siendo el anclaje con el mayor desplazamiento relativo, en este caso 76 mm, y, como ya se había enunciado, el anclaje que menos se desplaza es el último anclaje (R38), correspondiendo solamente al 44,74% del mayor desplazamiento con 34 mm.

En la figura A-1, a los 23,25 segundos de transcurrida la señal de 60 segundos, se halla el mayor desplazamiento relativo en el anclaje R3, desplazándose alrededor de 80 mm. En cuanto al menor desplazamiento, se obtuvo en un tiempo de 22.4 s correspondiente a 39 mm en el anclaje R38.

Según los resultados, se puede evidenciar que el sistema de contención presenta mayores desplazamientos cuando la señal se encuentra entre un rango de 20 a 30 segundos. De igual manera, estos dependen de la ubicación propia de los anclajes, ya que a medida que se encuentren más cerca de la superficie los desplazamientos aumentan.

En cuanto a las fuerzas axiales, en los casos propuestos, se puede observar que para las tres primeras filas la carga axial era menor comparada con las fuerzas que soportan las últimas, siendo los anclajes centrales, los que soportan una mayor carga axial, lo cual está directamente relacionado con el área aferente, ya que los anclajes ubicados en esa zona tienen un distanciamiento vertical mayor.

En la figura 3-15, se muestra que los anclajes R22, R23 y R24 son los que mayor fuerza axial asumen, los cuales pueden alcanzar hasta los 1415 KN

En la figura 3-16, se puede observar la distribución de los esfuerzos cortantes en la zona central del muro pantalla, en este, el color rojo indica las zonas de mayor esfuerzo, y el azul oscuro las zonas menores. La zona del muro con los mayores esfuerzos cortantes coincide con la zona en donde se encuentran ubicados los anclajes de la fila 5 los cuales son los que mayor carga axial asumen, así mismo, la zona de menores esfuerzos cortantes coincide con la fila 1 los cuales son los anclajes que poseen menor carga axial.

4.1.2 Caso 2

Para los casos 2-A, 2-B y 2-C, se consideró la falla del anclaje 23, este anclaje es considerado como un elemento fundamental dentro del sistema de reforzamiento debido a su ubicación, ya que, abarca una mayor área aferente y por lo tanto asume una mayor carga.

La falla del elemento 23 genera un incremento mínimo de los desplazamientos en el sistema. Inicialmente para el modelo del caso 1-A el anclaje R28 contemplaba unos desplazamientos de 47.1 mm (Figura 3-17), y una vez fue fallado el anclaje R23 (caso 2-A), se observa un incremento muy poco significativo (0,5 mm) del alrededor del 1% en el anclaje R28.

En el caso 2-B, se falla el anclaje R23 para la señal de 40 segundos, en la tabla de resultados A-6 se puede evidenciar que el tiempo en donde se generan los mayores desplazamientos coincide con el tiempo del modelo que aún presenta el anclaje. Los desplazamientos son muy similares a los registrados en el caso 1-B, generándose un aumento del 1,25% en los anclajes cercanos a la zona en la cual se simula la falla del anclaje, afectando principalmente al anclaje inmediatamente superior, es decir el anclaje R18.

Se puede decir que la falla del elemento 23 genera un aumento mínimo en los desplazamientos, ya que el anclaje que mayor aumenta sus desplazamientos relativos, es el anclaje R18 y este solamente abarca un poco más del 1% de su condición inicial cuando en el sistema de contención no se presentaba ninguna falla en los anclajes.

Como se puede observar en la figura 3-18, los resultados de las fuerzas axiales, para los casos propuestos no presentan mayor diferencia entre sí, ya que, el incremento de las cargas axiales, una vez llevado a la falla el anclaje R23, se encuentra entre el 20 y 27% para los tres casos en los anclajes más cercanos a la zona circundante al anclaje fallado, es decir, los anclajes R22 y R24. Por otro lado, si se realiza una comparación de las fuerzas axiales halladas en el caso 1 y las fuerzas axiales del presente caso, se evidencia un incremento de aproximadamente 306 KN en el anclaje R22, siendo este el más afectado por la falla del anclaje R23; además se puede observar que los anclajes que se encuentran más alejados a la zona de falla presentan un menor incremento con respecto a las cargas iniciales.

En la figura 3-19, se observa la distribución de los esfuerzos cortantes en el muro, en este se refleja una diferencia notable con respecto a la figura 3-16 (caso 1) en la zona en donde se ubican los anclajes de la fila 5, sobre todo en la ubicación del anclaje R23, en donde se

puede ver que los mayores esfuerzos cortantes se agrupan alrededor de este, lo cual permite correlacionar el incremento de carga de los anclajes cercanos con el anclaje fallado.

4.1.3 Caso 3

En el caso 3 se fallan los anclajes R23 y R24 (figura 3-20), se puede evidenciar que de igual manera que en los casos anteriores, los desplazamientos aumentan a medida que se asciende por el muro de contención, asimismo sus desplazamientos aumentan un aproximado de 2.4 % en los anclajes contiguos a la zona en la cual se simula la falla de los anclajes mencionados.

Con la falla de los anclajes R23 y R24 para los casos 3-A, 3-B y 3-C (Figura 3-21), se observa un mayor incremento de carga en los anclajes R22, R28 y R29 por encontrarse más próximos al área en la cual se simula la falla de los anclajes incrementando su carga cerca de un 28% con respecto a las fuerzas axiales halladas en el caso 1.

El mayor incremento de fuerzas coincide en el anclaje R22, aumentándose su fuerza axial en aproximadamente 1500 kN con respecto a su carga de pretensionamiento inicial en los tres casos considerados en el análisis. El anclaje en el cual se obtuvo una menor variación fue el anclaje R37, se generó un incremento, menor a 1 KN como se observa en la figura 3-21, ya que este elemento se encuentra a una distancia aproximada de 6 m con respecto al anclaje faltante.

En general, se mantienen las fuerzas axiales con una carga similar a la inicial, sin embargo, se evidencia que en ciertos anclajes se presenta una disminución de la carga en los anclajes de la fila 3 y la fila 7.

En la figura 3-22 se observa el diagrama de esfuerzos cortantes cuando se realiza la falla de los anclajes R23 y R24. En este se refleja que los mayores esfuerzos cortantes se concentran en los anclajes circundantes a los anclajes faltantes, aumentando sus esfuerzos en un aproximado del 27% a comparación de su condición inicial.

4.1.4 Caso 4

La falla del anclaje R3 genera un aumento de los desplazamientos relativos de los anclajes ubicados en la zona superior del sistema de contención, aumentando sus desplazamientos en un aproximado de 1.7% de su valor inicial (figura 3-23).

En general, el aumento de los desplazamientos relativos en el caso 4 es insignificante ya que los anclajes más cercanos al anclaje fallado (R8, R2 y R4) tienen un aumento aproximado de 1.26 mm, lo cual es muy poco a comparación de los desplazamientos relativos obtenidos en la condición inicial.

En la figura 3-24 se presentan los resultados de las fuerzas axiales para los casos C4-A, C4-B y C4-C en los cuales se generó la falla del anclaje R3. Se observa un incremento de las fuerzas axiales para los casos mencionados en el anclaje R8, con un valor promedio de 134 kN (26%) con respecto a la carga presentada en el caso 1; los menores incrementos se obtuvieron en el anclaje R13 de la fila 3, disminuyéndose las fuerzas axiales un valor promedio de 10.3 KN con respecto a su carga presentada en el caso 1.

En la figura 3-25 se observa el diagrama de esfuerzos cortantes una vez fue fallado el anclaje R3, en este se refleja la ausencia de esfuerzos cortantes en donde no se presenta este anclaje, lo que hace que en los anclajes vecinos R8, R4 y R2 aumenten sus esfuerzos cortantes de acuerdo con sus fuerzas axiales en un promedio aproximado del 26.71 %. Por otro lado, también se puede observar que, aunque se presenta una falla de pretensionamiento en el anclaje R3, la concentración de los mayores esfuerzos cortantes se sigue presentando en la fila 5 del sistema de contención, todo esto debido a que esta fila abarca una mayor área aferente, y que los anclajes que se ubican a una mayor profundidad son los asumen las mayores cargas axiales.

4.1.5 Caso 5

Cuando se habla de desplazamientos relativos para los casos en donde se presenta falla en el anclaje R38 (figura 3-26), se puede decir que los cambios no son significativos, ya que este soporta los menores desplazamientos en el sistema de contención, y sus resultados son casi que equivalentes a los presentados en el caso 1.

En cuanto a las fuerzas axiales presentadas en el sistema una vez es fallado el anclaje R38, se puede observar en la figura 3-27 que a comparación de los resultados del modelo que tiene todos los anclajes, los modelos del caso 5 presentan un incremento de fuerzas axiales en los anclajes contiguos R37 y R39 de 8.31% y 8.34% respectivamente, lo que corresponde a un 65% más de su capacidad inicial.

Para este caso, el diagrama de esfuerzos cortantes (figura 3-28), muestra que los esfuerzos cortantes asumidos por la fila 8 y con falla en el anclaje R23 conserva la tendencia de concentración de mayores cargas axiales en la parte inferior del sistema de contención, lo que corresponde a una mayor profundidad en el proyecto.

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El presente proyecto llevó a cabo un análisis dinámico a partir de un modelo calibrado en 3D en el software Midas GTS NX, en el cual se realizó la evaluación del comportamiento del sistema de muro anclado ante fallas parciales presentadas en los anclajes estratégicos cuando son aplicadas cargas sísmicas.

- La distribución de los esfuerzos cortantes permite correlacionar el incremento de carga con el anclaje fallado, por lo cual, fue importante obtener los diagramas que representan visualmente la concentración de los esfuerzos cortantes en la zona circundante a la falla. El caso que tuvo un mayor incremento de los esfuerzos cortantes en las zonas cercanas a la falla de los anclajes fue el caso 3, afectando en mayor medida el anclaje inmediatamente superior (R22) y el anclaje inferior (R28), aumentando sus fuerzas axiales en comparación de la condición inicial en un aproximado de 27%. En general, para los casos del 2 al 5, los anclajes que mayor se veían afectados en esta medida eran los anclajes superior e inferior al anclaje fallado, siendo el caso 5 el que menor afecta a sus anclajes vecinos ya que sus fuerzas axiales aumentaron solamente un 8% a comparación de sus condiciones iniciales.
- Para las fuerzas axiales, se observó que, ante la falla de algún elemento en el sistema, se genera una redistribución de las cargas axiales en los elementos vecinos

al anclaje fallado, evidenciándose un mayor incremento de la carga axial en los elementos cercanos a la zona del anclaje fallado y un menor incremento de carga axial en los elementos más alejados de la zona de falla.

- Con relación a los desplazamientos relativos, se evidenció que la duración de los acelerogramas no incide de manera significativa en el aumento de los desplazamientos, de igual manera, la falla de los anclajes no representó un parámetro que afectara en gran escala al sistema de contención, siendo el caso 5 el menos afectado ya que sus valores de desplazamientos relativos fueron similares a los presentados en el caso 1 en donde el sistema de contención no presentaba falla en ninguno de sus anclajes. El caso que presentó los mayores desplazamientos relativos fue el caso 3, ya que, debido a su ubicación, este obtenía los mayores desplazamientos relativos, aumentando los desplazamientos de los anclajes cercanos en un 3 a 4% de su condición inicial.
- Para el análisis dinámico, se contemplaron sismos de diferente duración con el fin de evaluar la incidencia del tiempo tanto en los desplazamientos máximos del sistema, como para las fuerzas axiales. En este, se pudo determinar que el periodo del sismo no tiene mayor repercusión en el aumento significativo de desplazamientos y fuerzas, sin embargo, incide en la exigencia de los anclajes debido a que durante un mayor tiempo los elementos reciben incrementos de carga.
- El uso de los acelerogramas sintéticos como representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo fue de gran utilidad ya que el comportamiento de su espectro de respuesta fue semejante al espectro de diseño obtenido de la microzonificación sísmica de la zona. Por lo cual, las características de los acelerogramas sintéticos representan de manera adecuada el espectro de diseño de la norma.
- Los modelos en elementos finitos pueden ser aplicados en la resolución y diagnóstico de problemas de análisis estructural para la obtención de distintas características que presente el sistema como desplazamientos, deformaciones y tensiones, ya que representa acertadamente los diferentes escenarios y evalúa el rendimiento con la aplicación de diferentes criterios, esto lo hace un método beneficioso a la hora de

realizar proyectos debido a que su costo es menor al de la construcción de un modelo a escala.

5.2 Recomendaciones

El presente proyecto comprendió básicamente el análisis dinámico para un sistema de muro con anclajes activos, sin embargo, se conocen otros sistemas que puede que se comporten de una mejor manera ante la presencia de un sismo según las propiedades del suelo, para lo cual, se considera importante realizar las variaciones planteadas en diferentes sistemas de contención como los construidos mediante pilotes anclados. De igual manera se podría considerar variaciones en las señales teniendo en cuenta las propiedades de la zona y su sismicidad histórica.

Por otro lado, el alcance comprendió el análisis de fuerzas axiales y deformaciones en la cabeza de los anclajes, por lo cual, se podría complementar analizando la estabilidad y el factor de seguridad del talud por medio de un análisis dinámico y estático del modelo.

Para finalizar, se podría ejecutar un análisis con el mismo caso de estudio que comprenda un mayor alcance en cuanto a la zona de excavación donde sea necesaria la implementación del sistema de contención, igualmente, de existir una variación en el sistema de contención, se pueda evaluar ante la existencia del sismo.

A. Anexo: Graficas y tablas casos de análisis

Caso 1

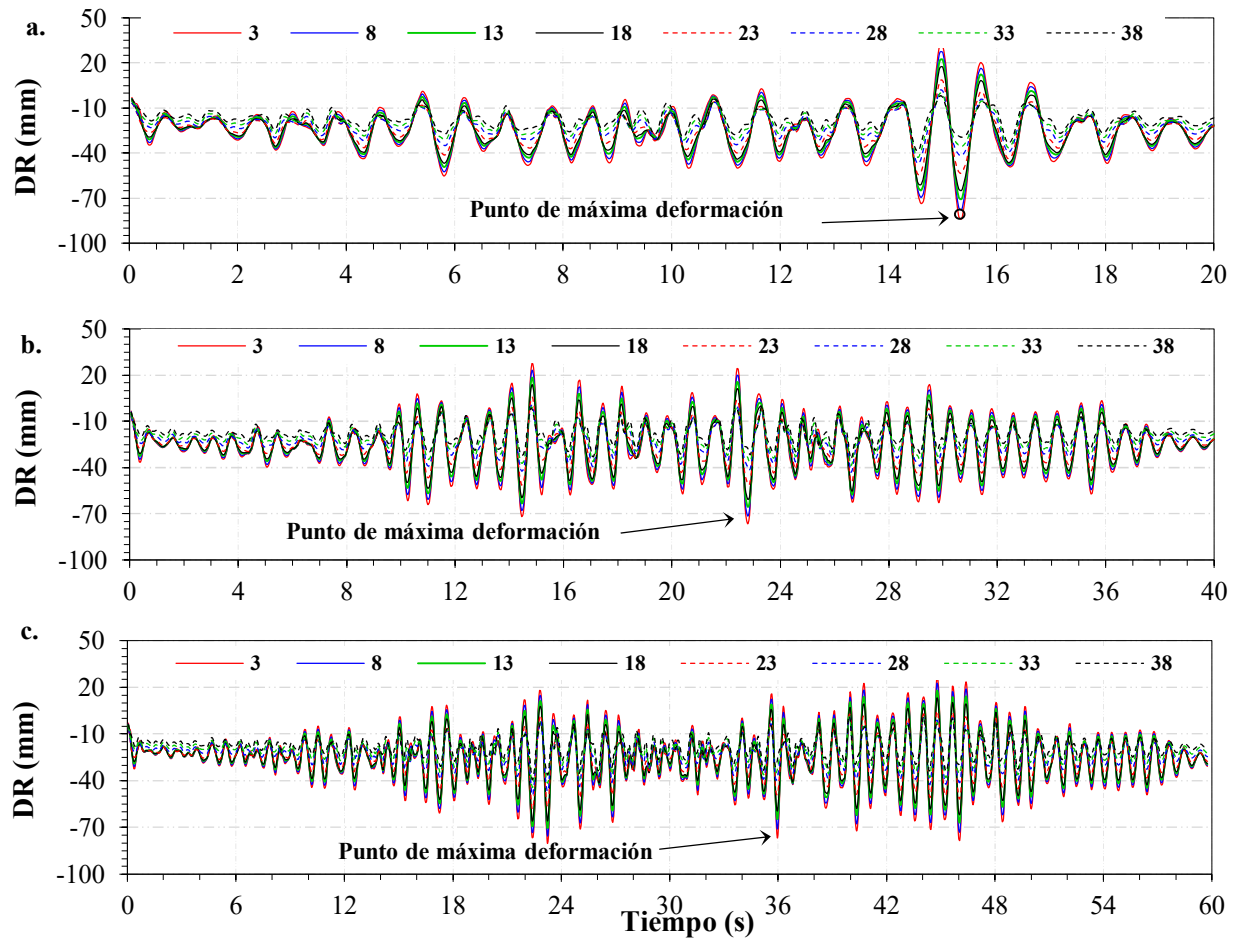


Figura A-1: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de **a.** 20 segundos, **b.** 40 segundos, **c.** 60 segundos. (Caso 1).

Anclaje	3	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	15.35				14.55			
Desplazamientos relativos (mm) máximos	83.73	77.5	70.5	64.72	54.34	47.129	42.8	38.57

Tabla A-1: Resultados desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos.

Anclaje	3	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	22.8				22.85	26.6		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	76.53	71.47	65.57	60.68	51.21	42.85	38.54	34.33

Tabla A-2: Resultados desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos.

Anclaje	3	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	23.25				22.4			
Desplazamientos relativos (mm) máximos	80.28	75.68	70.42	66	58.23	49.36	44.26	39.3

Tabla A-3: Resultados desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos.

Caso 2

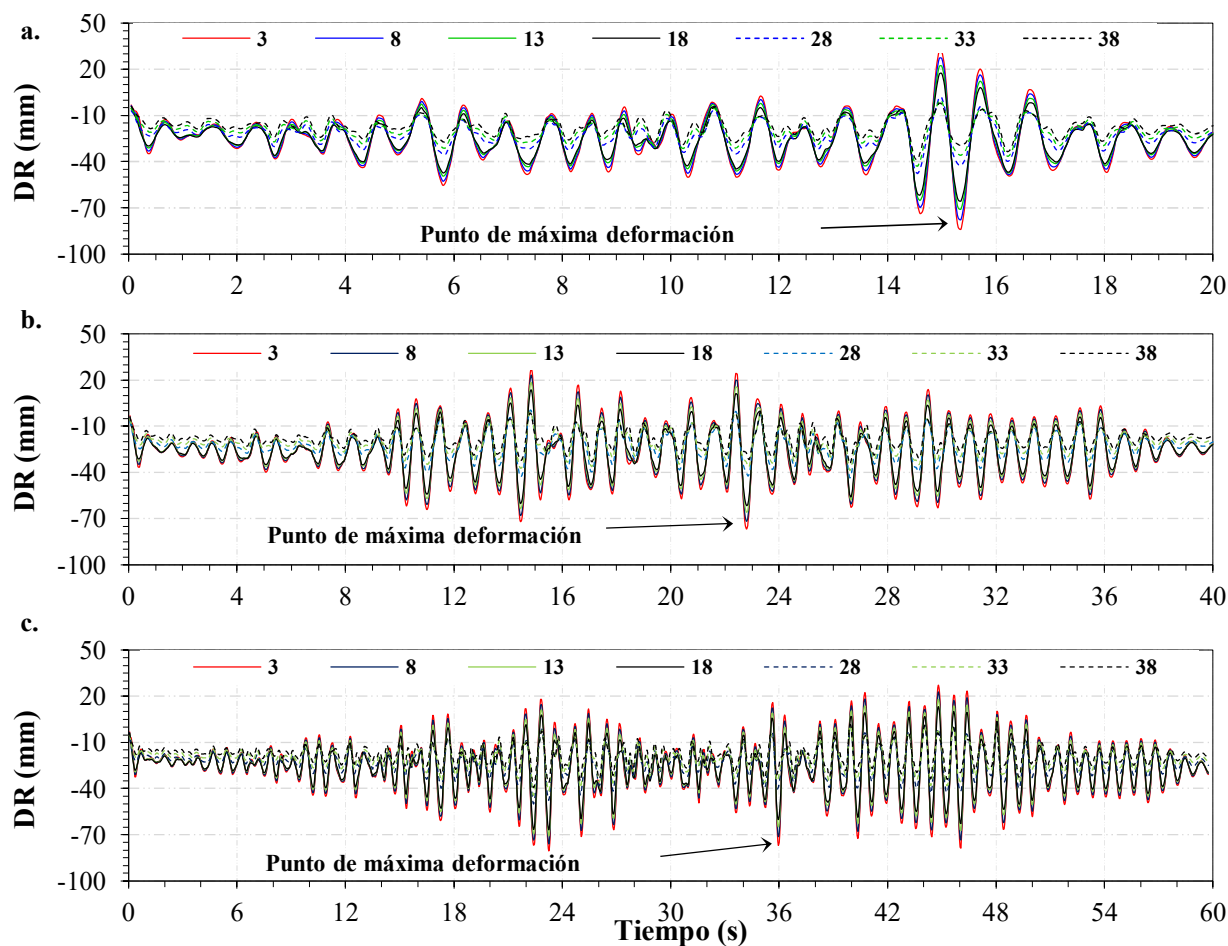


Figura A-2: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 2).

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Tiempo (s)	15.35				14.55		
Desplazamientos relativos (mm) máximo	83.9	77.7	70.8	65.5	47.6	42.9	38.6

Tabla A-4: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en el anclaje 23.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Diferencias desplazamientos relativos (mm)	0.162	0.212	0.313	0.809	0.516	0.148	0.037

Tabla A-5: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 20s Vs. Modelo con falla en el anclaje 23.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Tiempo (s)	22.8				26.6		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	76.69	71.68	65.87	61.49	43.42	38.67	34.37

Tabla A-6: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en el anclaje 23.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Diferencias desplazamientos relativos (mm)	0.16	0.21	0.30	0.81	0.57	0.13	0.03

Tabla A-7: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 40 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 23.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Tiempo (s)	23.25				22.4		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	80.43	75.88	70.70	66.73	49.95	44.40	39.35

Tabla A-8: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en el anclaje 23.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Desplazamientos relativos (mm) maximos	0.15	0.20	0.28	0.73	0.59	0.14	0.04

Tabla A-9: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 60 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 23.

Caso 3

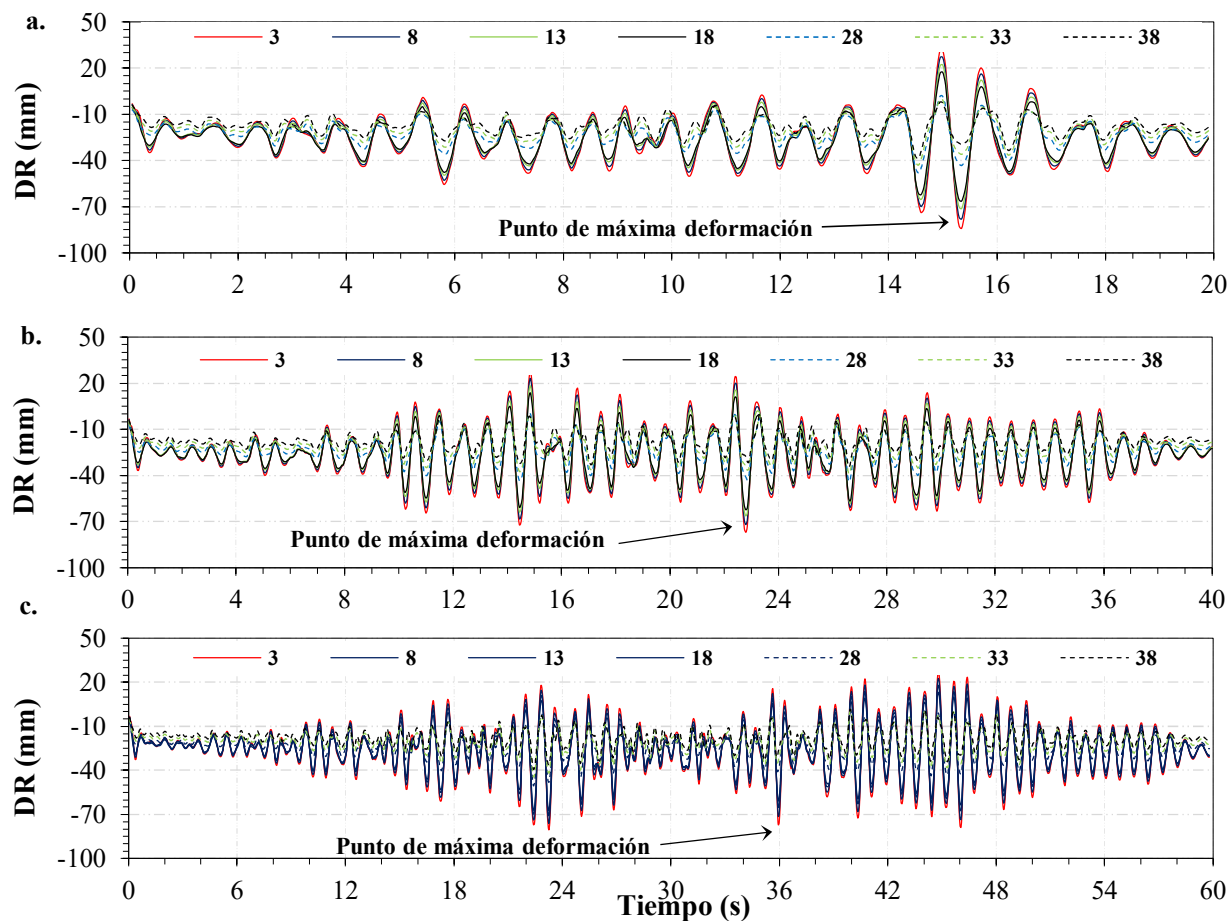


Figura A-3: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 3).

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Tiempo (s)	15.35				14.55		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	84.1	78.0	71.2	66.3	48.1	43.1	38.6

Tabla A-10: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en los anclajes 23 y 24.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Diferencias de desplazamientos relativos (mm)	0.38	0.49	0.68	1.62	0.97	0.25	0.07

Tabla A-11: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 20 s Vs. Modelo con falla en los anclajes 23 y 24.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Tiempo (s)	22.8				26.6		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	72.0	68.1	63.7	60.7	43.3	37.4	33.1

Tabla A-12: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en los anclajes 23 y 24.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Diferencias de desplazamientos relativos (mm)	0.4	0.5	0.7	1.6	1.1	0.3	0.1

Tabla A-13: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 40 s Vs. Modelo con falla en los anclajes 23 y 24.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Tiempo (s)	23.25				22.4		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	80.6	76.1	71.0	67.5	50.5	44.6	39.4

Tabla A-14: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en los anclajes 23 y 24.

Anclaje	3	8	13	18	28	33	38
Diferencias desplazamientos relativos (mm)	0.35	0.45	0.62	1.45	1.13	0.29	0.08

Tabla A-15: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 60 s Vs. Modelo con falla en los anclajes 23 y 24.

Caso 4

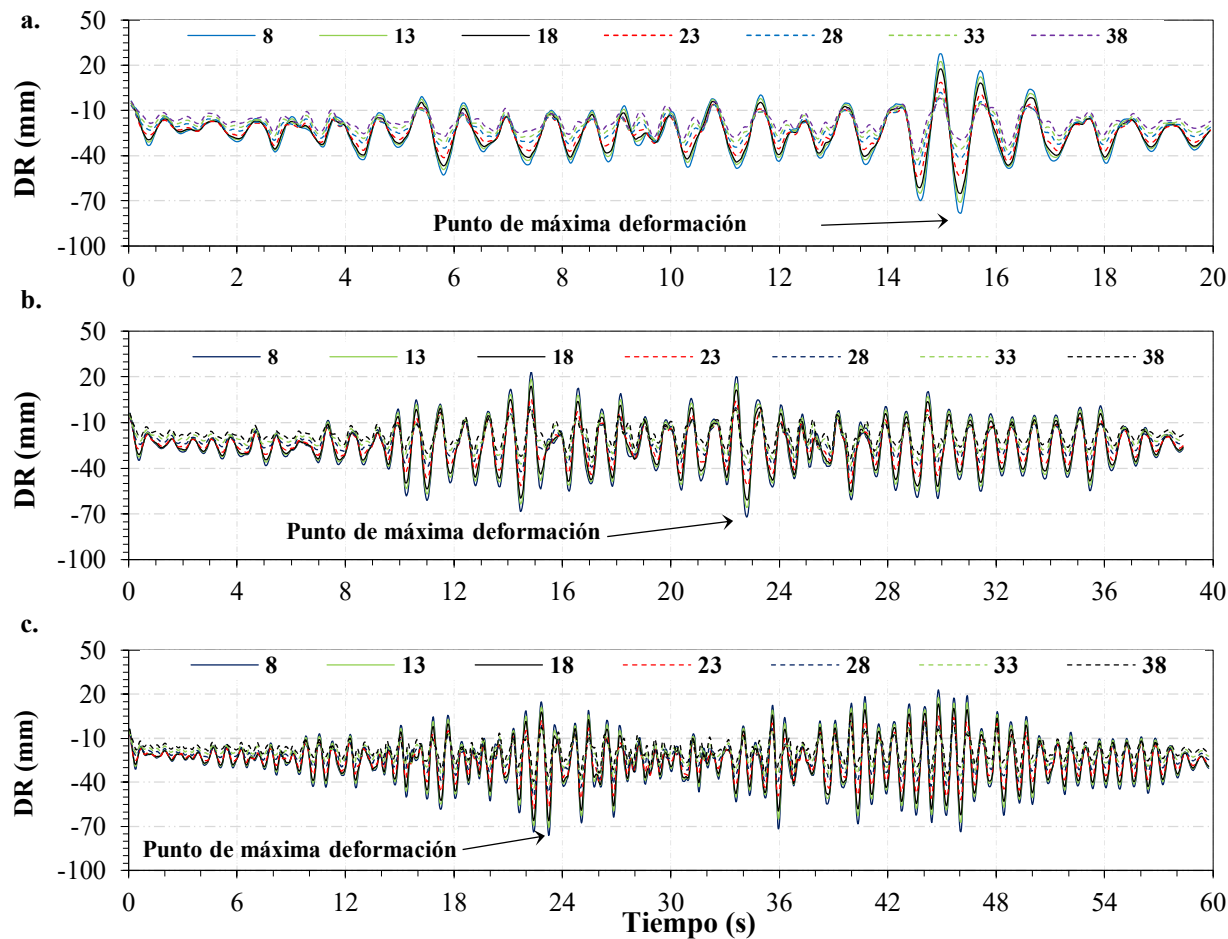


Figura A-4: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 4).

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	15.35			14.55			
Desplazamientos relativos (mm) máximos	78.13	70.81	64.92	54.38	47.14	42.84	38.58

Tabla A-16: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en el anclaje 3.

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Diferencias desplazamientos relativos (mm)	0.63	0.30	0.20	0.04	0.01	0.01	0.00

Tabla A-17: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 20 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 3.

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	22.8			22.85		26.6	
Desplazamientos relativos (mm) máximos	72.04	65.85	60.86	51.29	42.86	38.55	34.34

Tabla A-18: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en el anclaje 3.

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Diferencias de desplazamientos relativos (mm)	0.57	0.28	0.18	0.08	0.02	0.01	0.01

Tabla A-19: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 40 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 3.

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	23.25			22.4			
Desplazamientos relativos (mm) máximos	76.19	70.66	66.16	58.29	49.39	44.28	39.32

Tabla A-20: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en el anclaje 3.

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Diferencia de desplazamientos relativos (mm)	0.50	0.24	0.16	0.06	0.02	0.01	0.01

Tabla A-21: Diferencia de desplazamientos relativos modelo con todos los anclajes 60 s Vs. Modelo con falla en el anclaje 3.

Caso 5

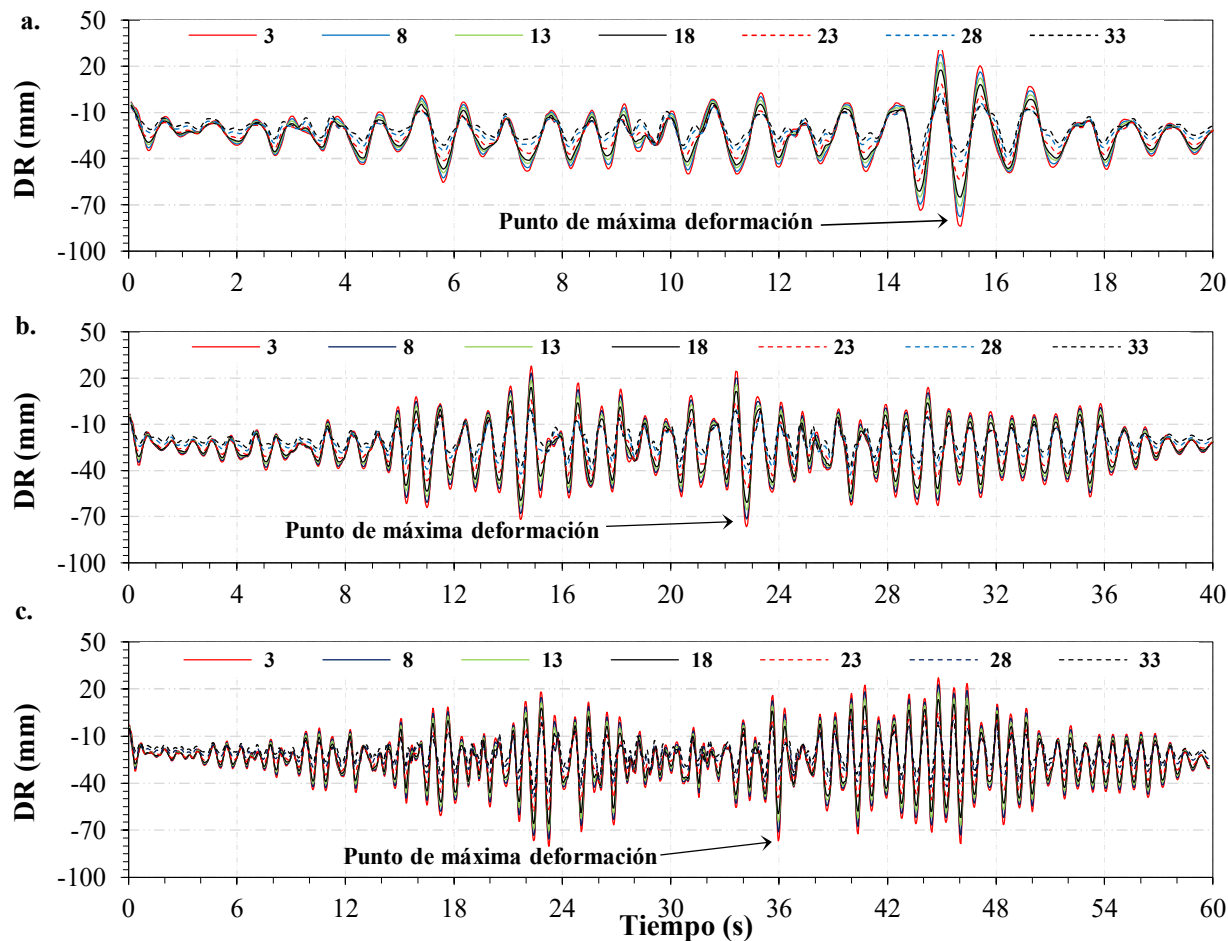


Figura A-5: Desplazamientos relativos en columna número 3 para la señal de a. 20 segundos, b. 40 segundos, c. 60 segundos. (Caso 5).

Anclaje	3	8	13	18	23	28	33
Tiempo (s)	15.35				14.55		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	83.72	77.50	70.51	64.72	54.35	47.15	42.88

Tabla A-22: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 20 segundos con falla en el anclaje 38.

Anclaje	8	13	18	23	28	33	38
Tiempo (s)	22.8			22.85	26.6		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	76.53	71.47	65.57	60.68	51.22	42.87	38.61

Tabla A-23: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 40 segundos con falla en el anclaje 38.

Anclaje	3	8	13	18	23	28	33
Tiempo (s)	23.25				22.4		
Desplazamientos relativos (mm) máximos	80.27	75.68	70.42	66.01	58.24	49.39	44.30

Tabla A-24: Resultados Desplazamientos relativos máximos señal 60 segundos con falla en el anclaje 38.

Bibliografía

- Ballón Benavente, A., & Echenique Sosa, J. F. (2017). *Análisis de estabilidad de muros de contención de acuerdo a las zonas sísmicas del Perú*.
- Cheng, X. S., Zheng, G., Diao, Y., Huang, T. M., Deng, C. H., Nie, D. Q., & Lei, Y. W. (2016). Experimental study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by cantilever piles. *Canadian Geotechnical Journal*, *54*(4), 574–587. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0284>
- Figueroa Díaz, G. E., Rofriguez Aguilar, F. A., & Zelada Segundo, E. E. (2011). *Análisis y diseño de estructuras de retención de aplicación reciente en el Salvador*.
- Freire Rosero, C. E. (2015). *Análisis y diseño de muros anclados de hormigón armado y su aplicación en la estabilización de excavaciones profundas de subsuelos*. 169. [https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11736/1/Tesis_879 - Rosero Freire Carlos Ernesto.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11736/1/Tesis_879_-_Rosero_Freire_Carlos_Ernesto.pdf)
- Lacera Torres, G. F. (2015). *Modelamiento de muros anclados para la estabilización de excavaciones en la construcción del proyecto ISWARÁ del sector comercial del municipio de Barrancabermeja, Santander*. Universidad de Santander.
- Lucero Pardo, F. H., Pachacama Caiza, E. A., & Rodriguez Montero, W. A. (2012). Analisis y diseño de muros de contención. *Universidad Central Del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matematica, Figura 1*, 1–393. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/156?mode=full>
- Maleki, J., Pak, A., Yousefi, M., & Aghakhani, N. (2022). A comprehensive FE study for design of anchored wall systems for deep excavations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *122*(December 2021), 104340. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104340>
- MidaSoft. (2019). *User manual Midas GTS NX*.

- Molina Orbea, S. J., & Pimentel Pimentel, J. A. (2021). *Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con midas gts nx NX*.
- Navarro, R. U. (2002). Manual de Anclajes en Obras de Tierras. *Facultad de Ingeniería Merida Venezuela*, x, 214. http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libros-electronicos/Libros/manual_anclaje/pdf/librocompleto.pdf
- Rengifo Reateguá, J. J. (2015). Muros anclados en arenas, análisis y comparación de técnicas de anclajes. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, 1, 113. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6097/ACOSTA_CARLOS_DISEÑO_MAQUINA_REBANADORA.pdf?sequence=1
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999). *Ground anchors and anchored systems*. GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR NO. 4. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/712>
- Ugaz Sánchez, J. H. (2018). *Análisis técnico del uso de muros anclados y empotrados para excavaciones profundas en suelos gravosos y rellenos*. 93. http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/8757/1/2018_Ugaz-Sachez.pdf
- Vélez Velásquez, P. (2018). *Estructuras de Contención Construidas a partir de Barras de Acero o Tubos Inyectados*.
- Xu, X., & Huang, Y. (2021). Parametric study of structural parameters affecting seismic stability in slopes reinforced by pile-anchor structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147(April). <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106789>
- Zapata Agudelo, A. J. (2014). *Manual de usuario Acelsin*.