

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS						
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 20 de enero del 2025

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

NEIVA (HUILA)

El (Los) suscrito(s):

CÉSAR RICARDO CANO MORENO, con C.C. No. 1.075.311.828,

VÍCTOR FÉLIX MANCHOLA MONTEALEGRE, con C.C. No. 1.075.314.767,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado: “ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE UN SISTEMA DE CONTENCIÓN BASADO EN ANCLAJES ACTIVOS CON PANTALLA Y DADOS EN CONCRETO COMO SUPERFICIE DE APOYO, MEDIANTE UN MODELO NÚMÉRICO”, presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de Ingenieros civiles.

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

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

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

Vigilada Mineducación

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



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

CÉSAR RICARDO CANO MOREN

CC: 1075311828

Firma:

César Cano

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

VÍCTOR FELIX MANCHOLA MONTEALEGRE

CC: 1075314767

Firma:

Víctor F. Manchola

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.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO					ISO 7384-1 SA-CERE 987526 OS-CER 987555	
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: “Análisis paramétrico de un sistema de contención basado en anclajes activos con pantalla y dados en concreto como superficie de apoyo, mediante un modelo numérico”

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CANO MORENO	CÉSAR RICARDO
MANCHOLA MONTEALEGRE	VÍCTOR FÉLIX

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GIL HERNANDEZ	JACKSON ANDRES

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GIL HERNANDEZ	JACKSON ANDRES

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERÍA CIVIL

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.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4

CIUDAD: NEIVA (HUILA) **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2025 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 19

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

Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general X Grabados___
 Láminas___ Litografías___ Mapas X Música impresa___ Planos X Retratos___ Sin ilustraciones___
 Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Lector de pdf o navegador eb

MATERIAL ANEXO:

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Análisis paramétrico</u>	<u>Parametric Analysis</u>
2. <u>Modelo numérico</u>	<u>Numerical Model</u>
3. <u>3D</u>	<u>3D</u>
4. <u>Sistemas de contención</u>	<u>Containment Systems</u>
5. <u>Sistemas Anclados</u>	<u>Anchored Systems</u>

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En el presente artículo se evaluó la variación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por anclajes activos mediante un análisis paramétrico, considerando dos tipos de superficies de apoyo: pantalla continua y bloques de concreto individuales. Se desarrolló un modelo numérico en tres dimensiones (3D) en el software Midas GTS-NX, el cual utiliza el método de elementos finitos (MEF) para simular el comportamiento del sistema de retención. El modelo fue calibrado gracias a los desplazamientos obtenidos in situ, y se analizaron 46 casos de estudio con

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO					SC 7384-1 SA-CERIE 087526 OS-CER 087555	
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4

variaciones en el ángulo de inclinación, longitud y distribución de los anclajes. El análisis consideró los desplazamientos horizontales, factores de seguridad y esfuerzos cortantes obtenidos por el software revelando que el ángulo de inclinación y la distribución de los anclajes influyen significativamente en el desempeño del sistema. En general, la pantalla continua mostró mejor rendimiento que los bloques de concreto individuales, proporcionando menores deformaciones y una distribución más uniforme de esfuerzos gracias a su continuidad estructural. Además, se determinó que el ángulo de inclinación óptimo para los anclajes está entre 10° y 25°. Respecto a la distribución, la configuración “atresbolillo” mejoró la respuesta del sistema frente a una disposición en cuadrícula, reduciendo desplazamientos y optimizando la distribución de los esfuerzos cortantes. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para optimizar el diseño de sistemas de contención con anclajes activos, maximizando su eficacia y estabilidad estructural.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

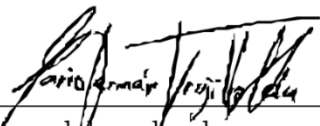
In this article, the variation of the mechanical behavior of a containment system composed of active anchors was evaluated through a parametric analysis, considering two types of support surfaces: continuous wall and individual concrete blocks. A three-dimensional (3D) numerical model was developed using Midas GTS-NX software, which employs the finite element method (FEM) to simulate the behavior of the retention system. The model was calibrated based on displacements obtained in situ, and 46 case studies were analyzed with variations in the inclination angle, length, and distribution of the anchors. The analysis considered horizontal displacements, safety factors, and shear forces obtained from the software, revealing that the inclination angle and distribution of the anchors significantly influence the system's performance. Overall, the continuous wall showed better performance than the individual concrete blocks, providing smaller deformations and a more uniform distribution of forces due to its structural continuity. Furthermore, it was determined that the optimal inclination angle for the anchors is between 10° and 25°. Regarding distribution, the “staggered” configuration improved the system's response compared to a grid arrangement, reducing displacements and optimizing the distribution of shear forces. These findings provide a solid basis for optimizing the design of containment systems with active anchors, maximizing their effectiveness and structural stability.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO					ISO 7384-1 SA-CERES 1917326 OS-CER 1917165	
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: MARIO GERMAN TRUJILLO VELA – DOCTOR EN INGENIERÍA

Firma:


Firma del evaluador

Nombre Jurado: ROBINSON ANDRÉS GARZÓN LEIVA - ESPECIALISTA

Firma:



Vigilada Mineducación

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

Análisis paramétrico de un sistema de contención basado en anclajes activos con pantalla y dados en concreto como superficie de apoyo, mediante un modelo numérico

César R. Cano-Moreno¹, Víctor F. Manchola Montealegre²

¹Estudiante, Universidad Surcolombiana, Programa Ingeniería Civil, Neiva, Colombia.

E-mail: u20151133103@usco.edu.co

²Estudiante, Universidad Surcolombiana, Programa Ingeniería Civil, Neiva, Colombia.

E-mail: u20151135130@usco.edu.co

1. RESUMEN

En el presente artículo se evaluó la variación del comportamiento mecánico de un sistema de contención compuesto por anclajes activos mediante un análisis paramétrico, considerando dos tipos de superficies de apoyo: pantalla continua y bloques de concreto individuales. Se desarrolló un modelo numérico en tres dimensiones (3D) en el software Midas GTS-NX, el cual utiliza el método de elementos finitos (MEF) para simular el comportamiento del sistema de retención. El modelo fue calibrado gracias a los desplazamientos obtenidos in situ, y se analizaron 46 casos de estudio con variaciones en el ángulo de inclinación, longitud y distribución de los anclajes. El análisis consideró los desplazamientos horizontales, factores de seguridad y esfuerzos cortantes obtenidos por el software revelando que el ángulo de inclinación y la distribución de los anclajes influyen significativamente en el desempeño del sistema. En general, la pantalla continua mostró mejor rendimiento que los bloques de concreto individuales, proporcionando menores deformaciones y una distribución más uniforme de esfuerzos gracias a su continuidad estructural. Además, se determinó que el ángulo de inclinación óptimo para los anclajes está entre 10° y 25°. Respecto a la distribución, la configuración “atresbolillo” mejoró la respuesta del sistema frente a una disposición en cuadrícula, reduciendo desplazamientos y optimizando la distribución de los esfuerzos cortantes. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para optimizar el diseño de sistemas de contención con anclajes activos, maximizando su eficacia y estabilidad estructural.

Palabras Clave: Análisis paramétrico, Modelo numérico en 3D, Sistemas de contención anclados.

2. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes es un campo de la ingeniería geotecnia que cumple un papel indispensable en el diseño, construcción e intervención de cualquier tipo de obra civil, debido a que, si se habla de algún proyecto de infraestructura, ya sea vial, urbanístico o hidráulico, el estudio geotécnico constituye el primer paso para el desarrollo de cualquier tipo de obra, y muchas veces condiciona la geometría y el proceso constructivo para su ejecución. Adicionalmente, la geotecnia proporciona la estabilidad o el mejoramiento de los estratos de suelos implicados en las zonas de interés para los proyectos constructivos, de esta forma se reducen los riesgos de deslizamientos de tierras garantizando la seguridad de las estructuras y de las personas implicadas. Es por ello que a lo largo de los años la geotecnia ha desarrollado, consolidado y perfeccionado, las técnicas para el diseño de sistemas de contención cada vez más efectivos, que mitigan sustancialmente los desplazamientos y aportan a la estabilidad de los suelos en periodos considerables de tiempo con el objetivo de mitigar y prevenir deslizamientos de tierras que generen daños a la infraestructura, la interrupción o deterioro en la calidad de algunos servicios, y que en muchos casos supone un riesgo para seguridad y la vida de los seres humanos [1].

En este contexto, los sistemas de contención con anclajes activos se han convertido en una técnica ampliamente utilizada, de fácil instalación, resistentes ante las deformaciones y que permiten realizar excavaciones de gran profundidad sin perjudicar las edificaciones colindantes. Este tipo de sistemas de contención proporcionan una resistencia adicional al suelo, redistribuyen las tensiones y reducen los desplazamientos del talud. Sin embargo, el correcto comportamiento de un sistema de contención basado en anclajes activos depende de una serie de características y condiciones en su diseño que deben ser evaluadas con detenimiento, como lo son las características propias del anclaje, es decir, su longitud, inclinación, número de cables, así como su distribución y superficie de apoyo sobre el talud [2].

El exponencial desarrollo tecnológico y más concretamente el desarrollo de herramientas digitales de cómputo ha permitido consolidar algunos métodos numéricos con alta aceptación en la comunidad científica. Este es el caso del método de elementos finitos (FEM) cuya ventaja radica en que no es necesario realizar hipótesis previas sobre la superficie de falla o fuerzas laterales ficticias [3]. Son varios los autores que han optado por el uso de aplicaciones informáticas a la hora de diseñar, evaluar y analizar el comportamiento del suelo en los sistemas de contención. Debido a las múltiples herramientas que este tipo de softwares ofrecen, es posible analizar diferentes parámetros y observar su incidencia en el comportamiento final del sistema suelo-estructura. Dicho comportamiento es expresado por el software mediante datos numéricos o gráficos, que dejan en evidencia la superficie de falla, las zonas de mayor y menor esfuerzo, las deformaciones y la determinación del factor de seguridad del sistema de contención en cuestión [1].

En el año 2009 Szavits Nossan, junto con su equipo de investigación, realizaron la calibración de un modelo numérico mediante un análisis de elementos finitos no lineales frente a mediciones de desplazamientos de tres muros de contención anclados diferentes incrustados en estratos de grava y arcilla rígida que se construyeron como estructuras temporales, que aseguraban dos pozos de excavación para aparcamientos subterráneos de dos edificios comerciales en Zagreb-Croacia. En su estudio propusieron una estrategia para el modelado numérico de estructuras de contención en suelos de rigidez media a rígida, dicha propuesta se verificó en cada caso y logró correspondencia entre los desplazamientos calculados y los medidos por inclinómetros de las estructuras de contención, con base a ello, se concluyó que los métodos de análisis computacionales complejos demuestran confiabilidad al simular adecuadamente el comportamiento del terreno, siempre y cuando estos se calibren teniendo en cuenta las mediciones obtenidas en campo mediante equipos y ensayos de monitoreo pertinentes [4].

El ingeniero Lacera Torres en el año 2015 realizó un modelo de muros anclados con el fin de estabilizar un talud vertical de una excavación para tres sótanos, haciendo uso de diferentes herramientas computacionales como Slide2.0 y Plaxis2D. Logró determinar que aunque el diseño de sistemas de contención anclados varía según las características de la estructura como lo son: el tipo de pantalla, el método de inyección, el número de niveles de los anclajes, las características del suelo y demás condiciones del entorno, son estas mismas variables las que determinan la efectividad del mismo. Por tanto, dicho método sigue ofreciendo ventajas a nivel económico y técnico con respecto a los sistemas convencionales [5].

Moghadam y Amirali Zad en el año 2019 llevaron a cabo un estudio para evaluar el desempeño de los muros de contención con anclajes, basándose en un modelado físico experimental. El objetivo principal era evaluar los efectos de las formas cuadradas y circulares de las placas soporte del anclaje, sus dimensiones, la configuración del refuerzo y su relación con la superficie de deslizamiento crítica que ocurre en el suelo que rodea el muro, y los efectos de estos parámetros en la cuña de falla. Los resultados mostraron que la mayor capacidad de carga y el menor desplazamiento horizontal del muro se dieron en las configuraciones de refuerzo en distribución en forma de diamante y forma de placa cuadrada. La configuración de diamante con un anclaje menos mostró una diferencia relativamente menor con respecto a los resultados encontrados para la configuración de 5 anclajes [6].

En el año 2022 Jafar Maleki, junto a su equipo de trabajo, publicó un estudio cuyo objetivo era proporcionar un marco de diseño racional para muros anclados al suelo considerando las deformaciones permisibles, basado en los resultados de un gran número de estudios paramétricos utilizando MEF, luego, considerando las deformaciones del muro, los movimientos del suelo, el factor de seguridad y basado en las pautas y recomendaciones de diseño expuestas en [9], se logró determinar un procedimiento de diseño que proporciona una longitud de perforación mínima, así como un número mínimo de tendones para casos particulares teniendo en cuenta las condiciones

específicas del sitio del proyecto, dichos valores se obtuvieron haciendo un acoplamiento continuo entre el software basado en MEF y un código Python desarrollado que busca el diseño óptimo para diferentes configuraciones de muros anclados [7].

A pesar de que muchos autores han realizado investigaciones sobre el comportamiento de muros anclados, a la fecha no hay claridad sobre la influencia de la superficie de apoyo en el comportamiento del sistema de retención, es por ello, que este trabajo busca evidenciar los parámetros de mayor incidencia en los anclajes frente a dos superficies de apoyo para un sistema de contención, considerando los desplazamientos horizontales, factores de seguridad resultantes y esfuerzos cortantes obtenidos del proceso de modelado, simulación y análisis por etapas efectuado en Midas GTS-NX.

3. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El caso de estudio utilizado para el análisis paramétrico corresponde a un sistema de contención conformado por anclajes activos apoyados sobre un muro de concreto (Ver Fig. 1). Este sistema fue implementado como estructura de contención donde se llevó a cabo una excavación de 20,3 m de profundidad, que posteriormente daría lugar a un proyecto urbanístico de nombre “Q-office” donde se realizaron 3 niveles de sótanos. El proyecto está ubicado en la ciudad de Medellín, específicamente en el barrio El Tesoro. Limita al sur con la calle 2 Sur, al norte con la quebrada “La Escopetería”, al oriente con una unidad residencial y al occidente con la Transversal Oriental (Ver Fig. 2) [8].

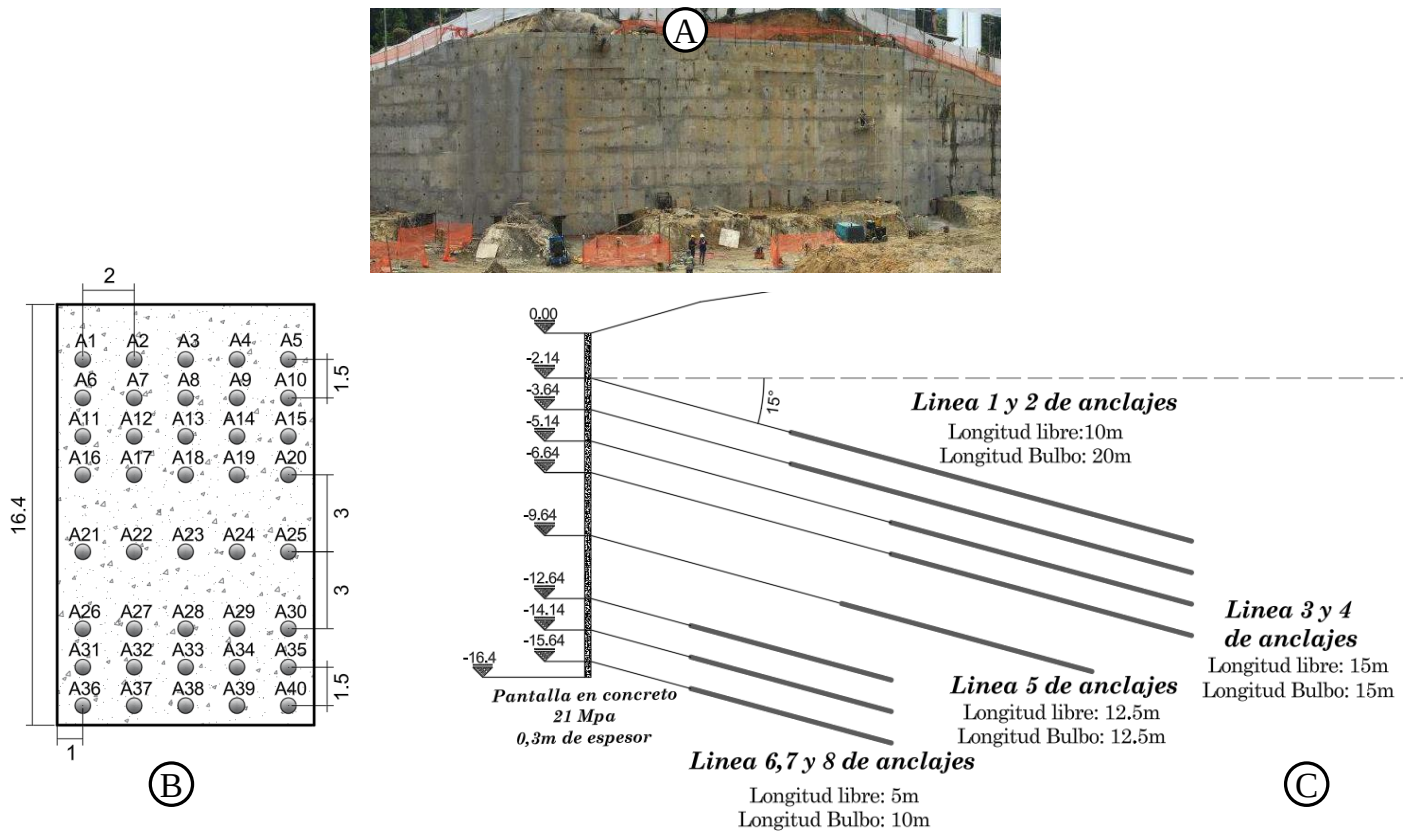


Fig. 1. Caso de estudio. A) Sistema de contención construido en el Valle de Aburrá. B) Vista frontal de la geometría del sistema. C) Perfil del sistema y geometría de los anclajes.

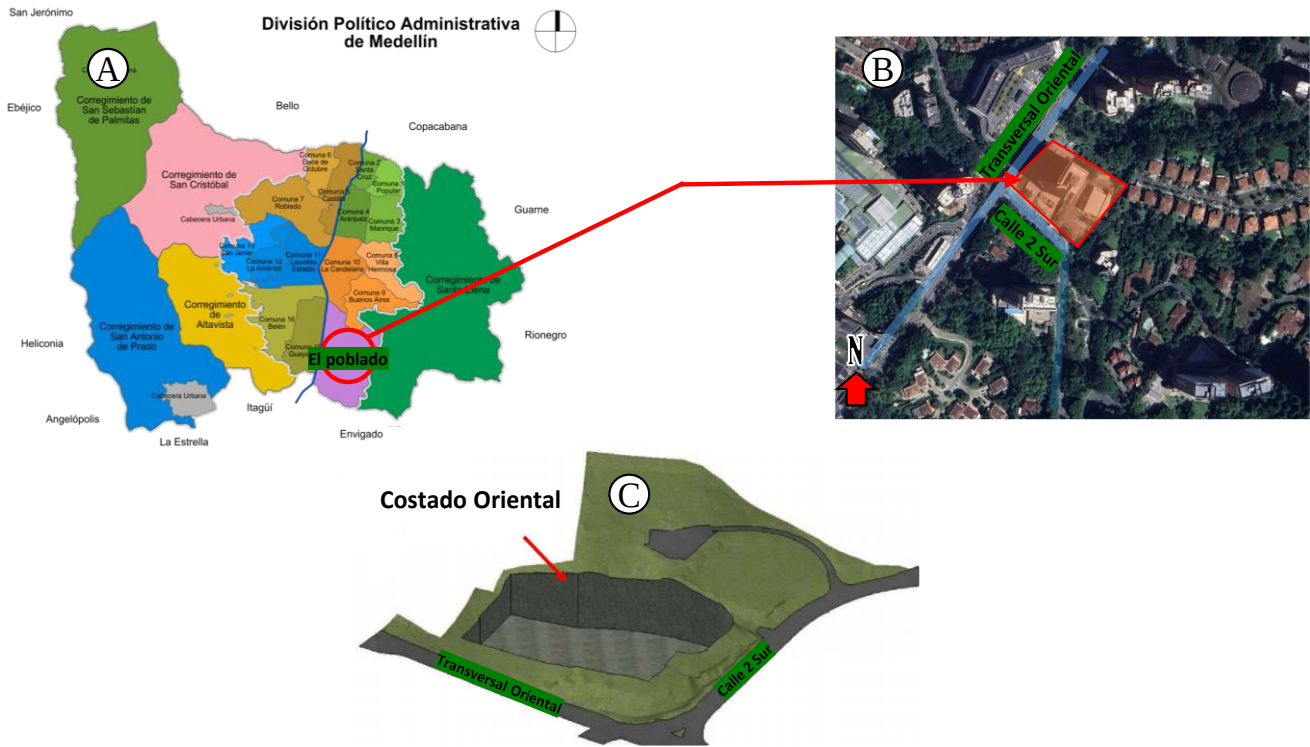


Fig. 2. Ubicación del proyecto. A) ubicación geográfica del Poblado en Medellín-Colombia. B) Ubicación residencial del proyecto. C) Esquema de la excavación realizada.

El proceso de excavación fue monitoreado en cada etapa del proceso constructivo, para ello fueron registradas las deformaciones horizontales del sistema de contención mediante el uso de 5 inclinómetros ubicados estratégicamente sobre el área del proyecto (Ver Fig. 3). Para esta investigación se usaron los datos obtenidos por el inclinómetro I-01, el cual registró los desplazamientos in situ hasta 30 metros de profundidad.

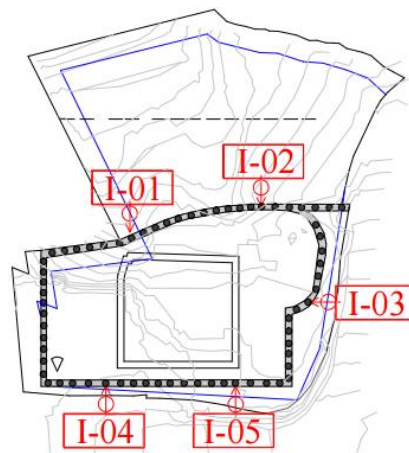


Fig. 3. Localización de los inclinómetros en el proyecto.

4. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO

Las propiedades geotécnicas del suelo fueron extraídas a partir de los ensayos de campo (Ensayo de penetración estándar STP, ensayo geofísico de refacción y ensayo de dispersión de ondas superficiales MASK, ensayos de corte directo y ensayos triaxiales) compilados en [8]. Gracias a los datos obtenidos por los sondeos en campo y a los ensayos de laboratorio, fue posible identificar y caracterizar tres estratos de suelo presentes en la zona a intervenir. A continuación, se describen los tres tipos de suelo.

El primer estrato tiene un espesor aproximado de 2,5 m. Corresponde a un depósito antrópico heterogéneo de gravas y fracciones de limos (QLL) en el cual se pueden apreciar algunos restos de material de construcción y la presencia de raíces. El segundo estrato posee un espesor aproximado de 16 m, corresponde a un flujo de lodos y escombros (QFL) con presencia de bloques de roca con geometría similar inmerso en una matriz de suelo con una estructura saprolítica y que presenta variable estado de meteorización. El tercer estrato, presenta un espesor variable, compuesto por una matriz limo arcillosa densa y tiene presencia de bloques de roca parental, principalmente el tercer estrato corresponde a saprolito de anfibolita (IC).

Tabla. 1. Propiedades mecánicas de los estratos del terreno y parámetros utilizados para los modelos constitutivos: Hardening-Soil y Mohr-Coulomb

Parámetro	Unid.	Estrato QLL	Estrato QFL	Estrato IC
Peso unitario (γ)	$\frac{kN}{m^3}$	21	19	20
Cohesión (c)	kPa	10	26	32
Ángulo de fricción (ϕ)	°	24	26	35
Módulo de elasticidad (ϵ)	kPa	35.000	50.000	50.000
Relación de Poisson (ν)	-	0,30	0,30	0,25

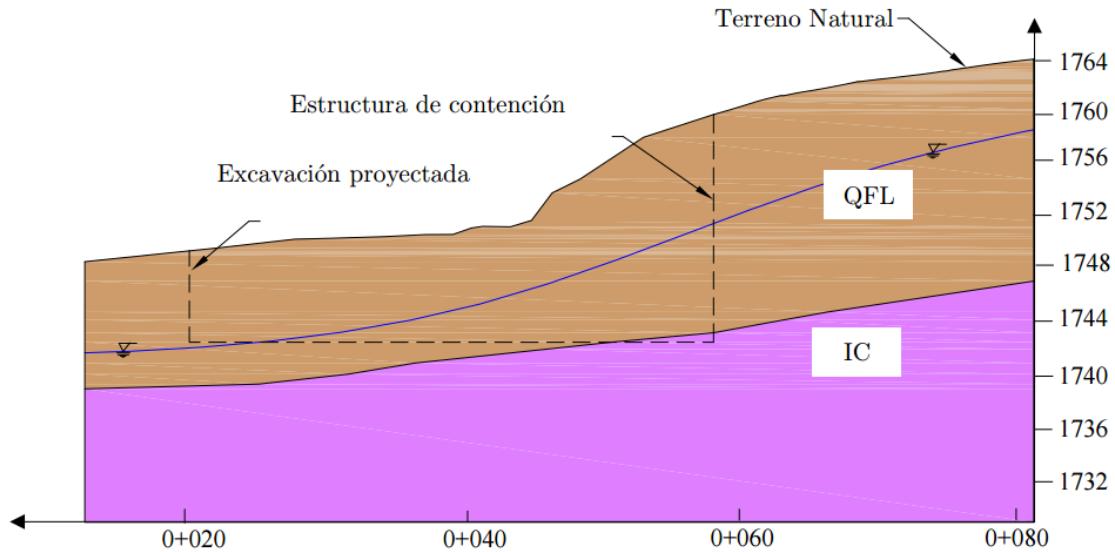


Fig. 4. Perfil geotécnico predominante.

5. MODELO NUMÉRICO

Para el modelo numérico se utilizó el software Midas GTSNX, en él se representaron los elementos del suelo y de la estructura de contención mediante su respectivo modelo tridimensional de elementos finitos (MEF-3D). El comportamiento de las deformaciones fue representado mediante el modelo constitutivo Hardening-Soil, mientras que el factor de seguridad y los esfuerzos cortantes fueron representados por medio del modelo constitutivo Mohr-Coulomb modificado. Para ambos modelos constitutivos se utilizaron los parámetros de entrada expuestos en la Tabla 1.

El modelo es una simulación geométrica y mecánica del sistema de contención descrito en [8], el cual se compone por 8 filas de anclajes activos de 51 mm de diámetro y longitud variable (Ver Fig.5), apoyados sobre una pantalla de concreto de 21 MPa y un espesor de 30 cm. Se generó un mallado de 2 m para los bordes exteriores del modelo y se aplicó un control de malla de 0,5 m para la pantalla de concreto, para los estratos en contacto con la pantalla y para los anclajes del sistema. El pretensionamiento de las primeras 4 líneas de anclajes es de 400 kN y las filas restantes 5,6,7 y 8 poseen un pre-tensionamiento de 300 kN.

Cada elemento geométrico del modelo posee un mallado que aporta las propiedades físico-mecánicas esenciales para simular adecuadamente el comportamiento del sistema suelo-estructura. La longitud libre del anclaje se consideró como un elemento 1D, tipo Embedded Truss cuyo módulo de elasticidad es de 200 GPa, un módulo de Poisson de 0,2 y un peso unitario de 72 kN/m³. Los elementos tipo Embedded Beam representan al bulbo del anclaje, también considerados como elementos de 1D con un módulo de elasticidad 18.000 MPa, un módulo de Poisson de 0,15 y un peso unitario de 24 kN/m³.

Para la pantalla en concreto se representó mediante elementos tipo Shell, se generó un mallado en 2D donde se especificó el espesor del elemento igual a 30 cm, con un módulo de elasticidad es de 21000 MPa, un módulo de Poisson de 0,15 y un peso unitario de 24 kN/m³.

Los estratos del suelo cuentan con un mallado en 3D de tipo Solid y poseen un modelo constitutivo Hardening-Soil para representar los desplazamientos horizontales, y se utilizó el modelo constitutivo Mohr-Coulomb para determinar los factores de seguridad y los esfuerzos cortantes en la cara del talud. Cada estrato cuenta con las propiedades expuestas en la Tabla 1. Se establecieron condiciones de frontera según la geometría del modelo, con el propósito de restringir los desplazamientos horizontales (Ejes X, Y) y verticales (Eje Z) en la parte inferior del modelo, mientras que para los límites laterales del modelo se restringen únicamente los desplazamientos horizontales (Ejes X, Y) del modelo 3D, el cual se aprecia en la Fig.5. De esta manera, el software interpreta el límite geométrico del modelo y restringe las deformaciones evitando que los estratos del suelo se desborden en la frontera geométrica. Finalmente se aplicó un análisis por etapas (Stage set) que simula el proceso constructivo real que se llevó a cabo en campo (Ver Tabla.2).

Nota: Dimensiones en metros.

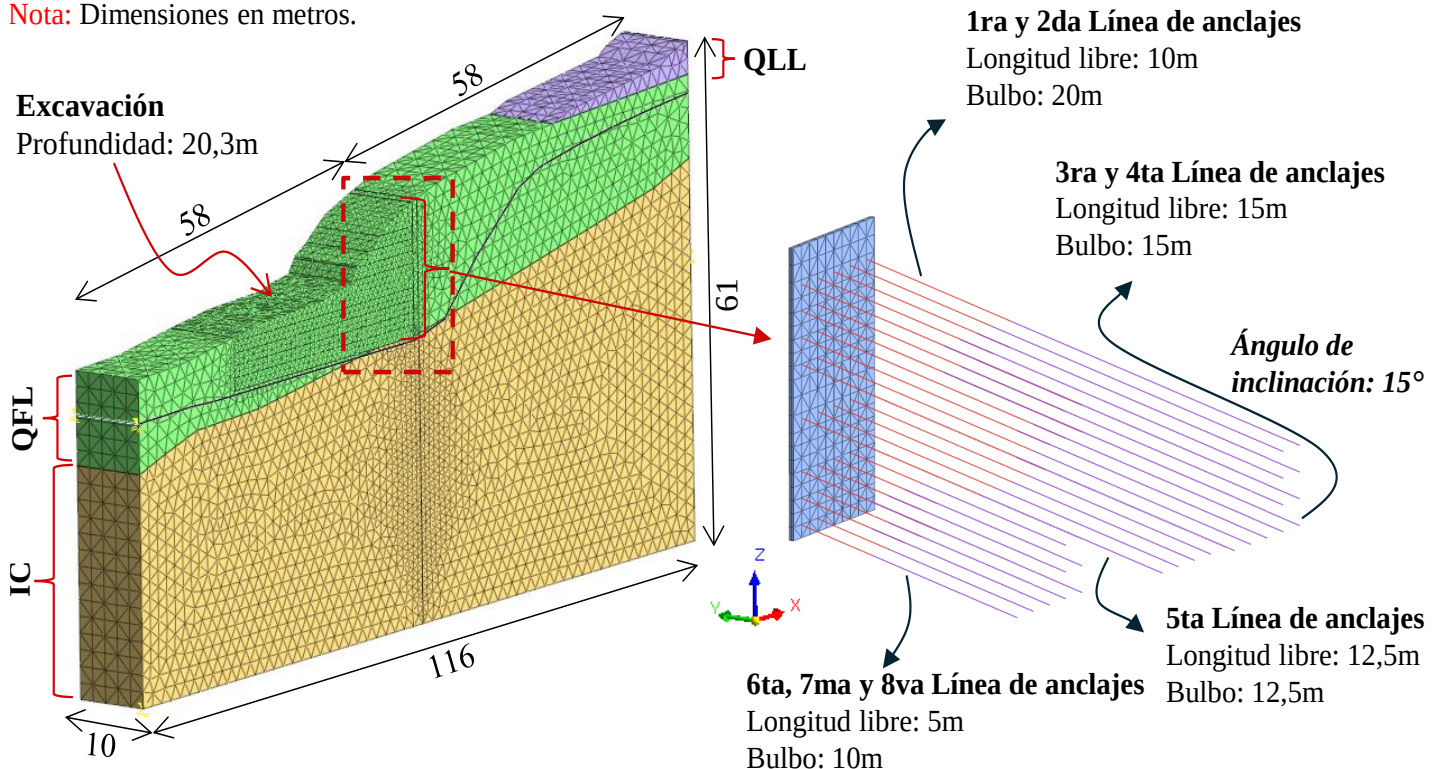


Fig. 5. Modelación del caso de estudio en el software MidasGTSNX.

Tabla. 2. Proceso constructivo implementado en el caso de estudio.

ETAPA	PROF. EJE Z	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO
1	0m	Se activan todos los elementos que representan las condiciones iniciales del suelo natural junto con las condiciones de frontera, gravedad y nivel freático.
2	0m	Esta etapa es Nula y su único propósito es restablecer los desplazamientos en el sistema.
3	-2,9m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la primera fila de anclajes.
4	-2,9m	Instalación de la primera línea de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
5	-2,9m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la primera fila de anclajes.
6	-4,4m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la segunda fila de anclajes.
7	-4,4m	Instalación de la segunda fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
8	-4,4m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la segunda fila de anclajes.
9	-5,9m	Excavación hasta 0,75 metros por debajo de la tercera fila de anclajes.
10	-5,9m	Instalación de la tercera fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
11	-5,9m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la tercera fila de anclajes.
12	-7,4m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la cuarta fila de anclajes.
13	-7,4m	Instalación de la cuarta fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
14	-7,4m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la cuarta fila de anclajes.
15	-10,4m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la quinta fila de anclajes.
16	-10,4m	Instalación de la quinta fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
17	-10,4m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la quinta fila de anclajes.
18	-11,9m	Excavación hasta 1,5m por debajo de la cota del último nivel de excavación.
19	-11,9m	Vaciado de pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
20	-13,4m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la sexta fila de anclajes.
21	-13,4m	Instalación de la sexta fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
22	-13,4m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la sexta fila de anclajes.
23	-14,9m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la séptima fila de anclajes.
24	-14,9m	Instalación de la séptima fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
25	-14,9m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la séptima fila de anclajes.
26	-16,4m	Excavación hasta 0,75m por debajo de la cota de la octava fila de anclajes.
27	-16,4m	Instalación de la octava fila de anclajes y vaciado de la pantalla en concreto hasta el nivel de excavación.
28	-16,4m	Instalación de platinas y pretensionamiento de la octava fila de anclajes.

6. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de los desplazamientos horizontales registrados en campo por el inclinómetro I-01 vs los desplazamientos obtenidos por el modelo numérico (Ver Fig.3), considerando las etapas constructivas 19, 24 y 27 del sistema de contención. Los registros del inclinómetro fueron tomados hasta una profundidad de 30 metros, los datos arrojados por el modelo numérico se ajustan adecuadamente a los obtenidos por el inclinómetro, con una variación aproximada del 5,31 % para cada una de las etapas constructivas, demostrando que el modelo numérico presenta un buen ajuste respecto al comportamiento en campo del sistema de retención.

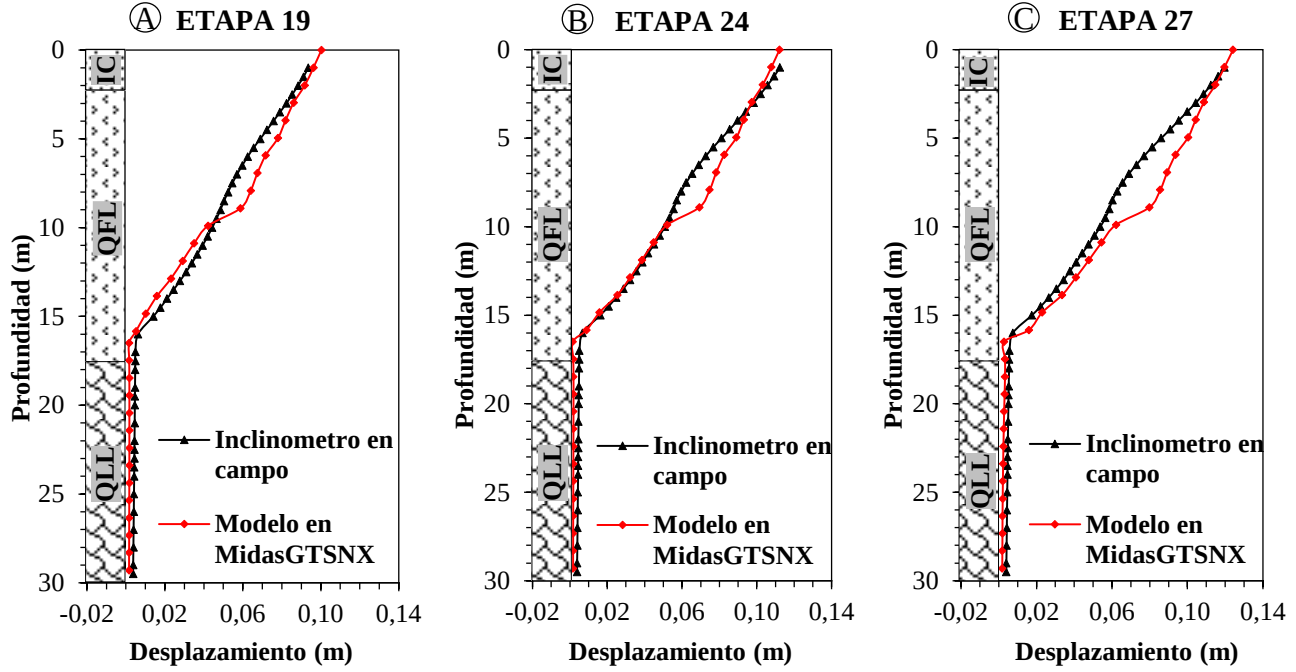


Fig. 6. Deformaciones registradas. A) Comparación de los desplazamientos en la etapa 19. B) Comparación de los desplazamientos en la etapa 24. C) Comparación de los desplazamientos en la etapa 27.

7. ANÁLISIS PARAMETRICO

Para llevar a cabo el análisis paramétrico se realizaron variaciones en algunos elementos que componen el modelo numérico. En total, se modelaron y evaluaron 46 casos de análisis. Se consideraron variaciones en los siguientes parámetros del sistema de contención: ángulo de inclinación del anclaje (15 casos, ver tabla 3), distribución de los anclajes (8 casos de análisis), y la variación de la longitud del anclaje considerando tanto la longitud del anclaje libre como la longitud del bulbo (22 casos de análisis).

Se realizó una comparación y análisis de los datos correspondientes a los desplazamientos y factores de seguridad obtenidos en cada caso de análisis para la última etapa constructiva (Etapa 27).

7.1. INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LOS ANCLAJES

Para evaluar este parámetro se modificaron los ángulos de inclinación de todos los anclajes del sistema, se modelaron en total 16 casos de análisis que abarcan desde los 5° hasta los 40° de inclinación con una variación cada 5° entre casos (Ver Tabla.3).

Tabla. 3. Casos de análisis para diferentes ángulos de inclinación de los anclajes.

CASOS PANTALLA	ÁNGULO °	CASOS DADOS	ÁNGULO °
C1	5	C9	5
C2	10	C10	10
C3 (Caso de estudio)	15	C11	15
C4	20	C12	20
C5	25	C13	25
C6	30	C14	30
C7	35	C15	35
C8	40	C16	40

A continuación, se presenta una comparativa para los diferentes ángulos de inclinación contemplados en el análisis, en ella, se relacionan los desplazamientos que sufre el sistema de contención a diferentes profundidades del talud.

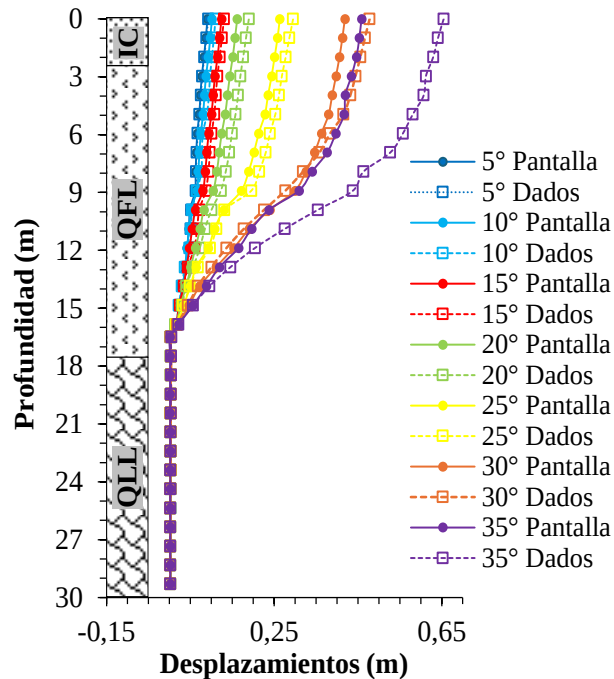


Fig. 7. Desplazamientos obtenidos para diferentes ángulos de inclinación.

Acorde a la Fig.7, se puede apreciar una relación directamente proporcional entre el ángulo de inclinación de los anclajes y los desplazamientos resultantes, ya que a mayor ángulo de inclinación en los anclajes más desplazamientos horizontales presenta el sistema [9]. Esto, se debe a que la transmisión de esfuerzos al anclaje, es decir, la carga generada por el propio peso del suelo se puede transmitir y contrarrestar de mejor forma a 0° con respecto a la horizontal o a 90° respecto a la cara de la pantalla según lo enunciado en [9].

Por lo que sería razonable deducir que la inclinación óptima para el diseño de una estructura de contención basada en anclajes activos corresponde a 5° con respecto a la horizontal, debido a que esta configuración presenta los menores desplazamientos con respecto a los otros ángulos de inclinación evaluados. Pero, si se consideran los aspectos prácticos del proceso constructivo es recomendable evitar ángulos de inclinación menores 10° ya que la inyección de la lechada para el bulbo se vuelve tediosa, requiere de inyección por bombeo lo que provoca un aumento en su costo, puede conllevar a pérdidas de material y errores a la hora de estimar la consistencia o el volumen de la mezcla de concreto. Todos estos inconvenientes constructivos pueden llevar a que la estructura no presente la fricción necesaria entre el bulbo y el suelo, afectando el comportamiento estimado de la estructura de contención [9].

De igual forma, se aprecia que a partir de los 20° de inclinación, los desplazamientos presentan un gran aumento respecto a los anteriores, evidenciando que más del 70 % de los desplazamientos de los casos evaluados, se presentan a partir de los 20° de inclinación, ya que el sistema hasta los 20° se había desplazado en el mayor de los casos 19 cm mientras que para 35° en dados son 69 cm de desplazamiento arrojando una diferencia de 50 cm (72,4%) considerando el mayor desplazamiento como el 100% (69 cm) (Ver fig.7).

Por otra parte, en la Fig.8A se evidencia que los desplazamientos máximos se presentan en la corona del talud ya que es allí, donde, debido al proceso constructivo a medida que excavamos se van acumulando desplazamientos en la parte superior del muro mientras que a partir de la base del muro los desplazamientos disminuyen y tienden a cero [9].

Aunque la tendencia de las deformaciones es similar en ambas superficies de apoyo, los desplazamientos son mayores para los dados de concreto en todos los casos analizados, excepto para 5° de inclinación, donde los desplazamientos en la corona del talud coinciden en 9 cm tanto en la pantalla como en los dados. Para los demás grados de inclinación, a la misma profundidad, los modelos con muro de concreto como superficie de apoyo presentan siempre menores desplazamientos.

Los casos de análisis C8 y C16 no se evidencian en la Fig.7 debido a la magnitud de sus desplazamientos máximos, los cuales superan el metro de longitud como se puede apreciar en la Fig.8A.

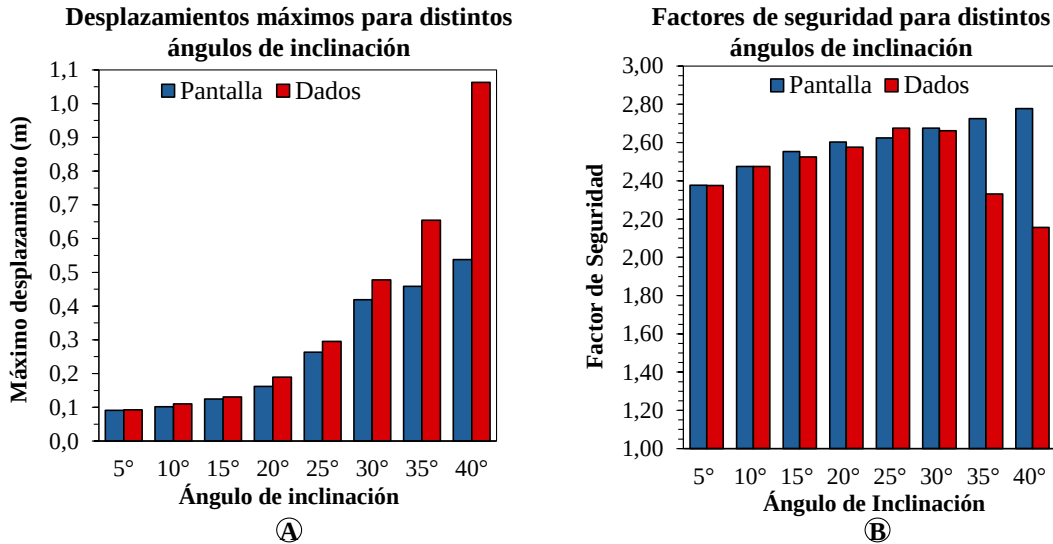


Fig. 8. Comparativa pantalla vs dados. A) Desplazamientos para diferentes ángulos de inclinación de los anclajes. B) Factores de seguridad para diferentes ángulos de inclinación.

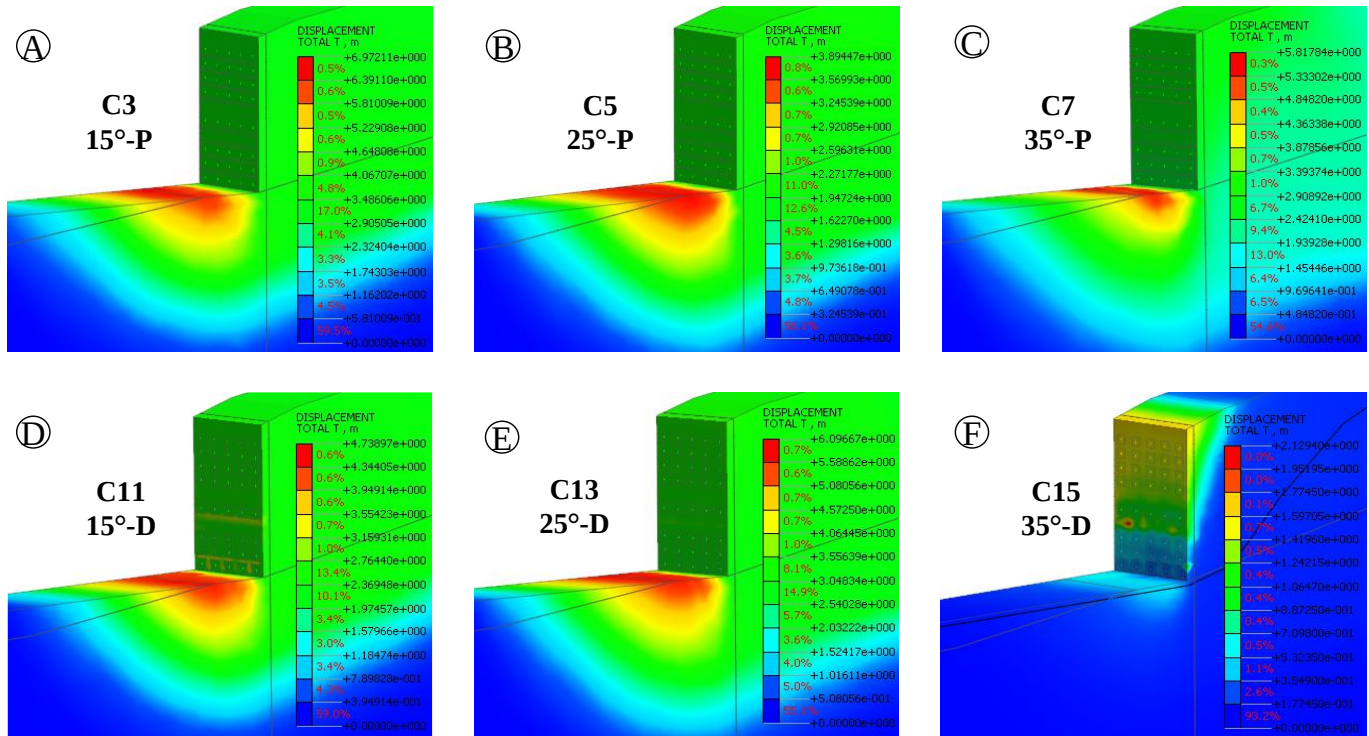


Fig. 9. Desplazamientos totales para los casos de análisis representativos con diferentes ángulos de inclinación de los anclajes. A) 15° Pantalla, B) 25° Pantalla, C) 35° Pantalla, D) 15° Dados, E) 25° Dados, F) 35° Dados.

Aunque se obtuvieron factores de seguridad sobresalientes para todos los casos de análisis, en la Fig. 9F se puede apreciar que C15 presenta una falla puntual, situada en la parte occidental de la estructura aproximadamente a un tercio de la altura a partir de la base de la excavación, esto, se debe a que la distribución de esfuerzos para una inclinación muy vertical es transmitida mayormente a la zona inferior del suelo dando cabida a una zona débil en el sistema, debido a las franjas sin superficie de apoyo lateral en concreto que corresponde a la separación entre los dados ya que no hay conexión directa entre ellos, y a su vez en los anclajes mismos, lo cual, genera una cuña de empuje activa que provoca la falla o rotura a modo de deslizamiento, concordando con lo observado en [10].

En los demás casos se producen levantamientos basales (rotura rotacional general) generados por el aumento de las presiones laterales del suelo, es decir, cuando el peso del suelo retenido excede o se acerca a la capacidad de carga del suelo en la base de la excavación el modelo constitutivo marca la falla general como lo encontró Y.M. Cheng en [11].

En la Fig. 8 se observa que el modelo con dados como superficie de apoyo y una inclinación de 40° corresponde al sistema menos eficiente, ya que presenta los mayores desplazamientos y el menor factor de seguridad. Sin embargo, en el caso de la pantalla como superficie de apoyo, aunque se registran también grandes desplazamientos para el mismo ángulo de inclinación, este modelo alcanza el mejor factor de seguridad. Esto sugiere que un sistema puede experimentar desplazamientos significativos y, aun así, ser más seguro que un sistema completamente rígido cercano al colapso. Este fenómeno se explica porque, al aumentar el ángulo de inclinación, el peso del suelo sobre los anclajes aumenta debido al incremento de su componente vertical, y a su vez la longitud efectiva de los anclajes se reduce. Esto resulta en mayores desplazamientos, pero al mismo tiempo reduce los sobre-esfuerzos en los anclajes, logrando un equilibrio entre la resistencia del sistema y los desplazamientos, coincidiendo con lo expuesto en [12].

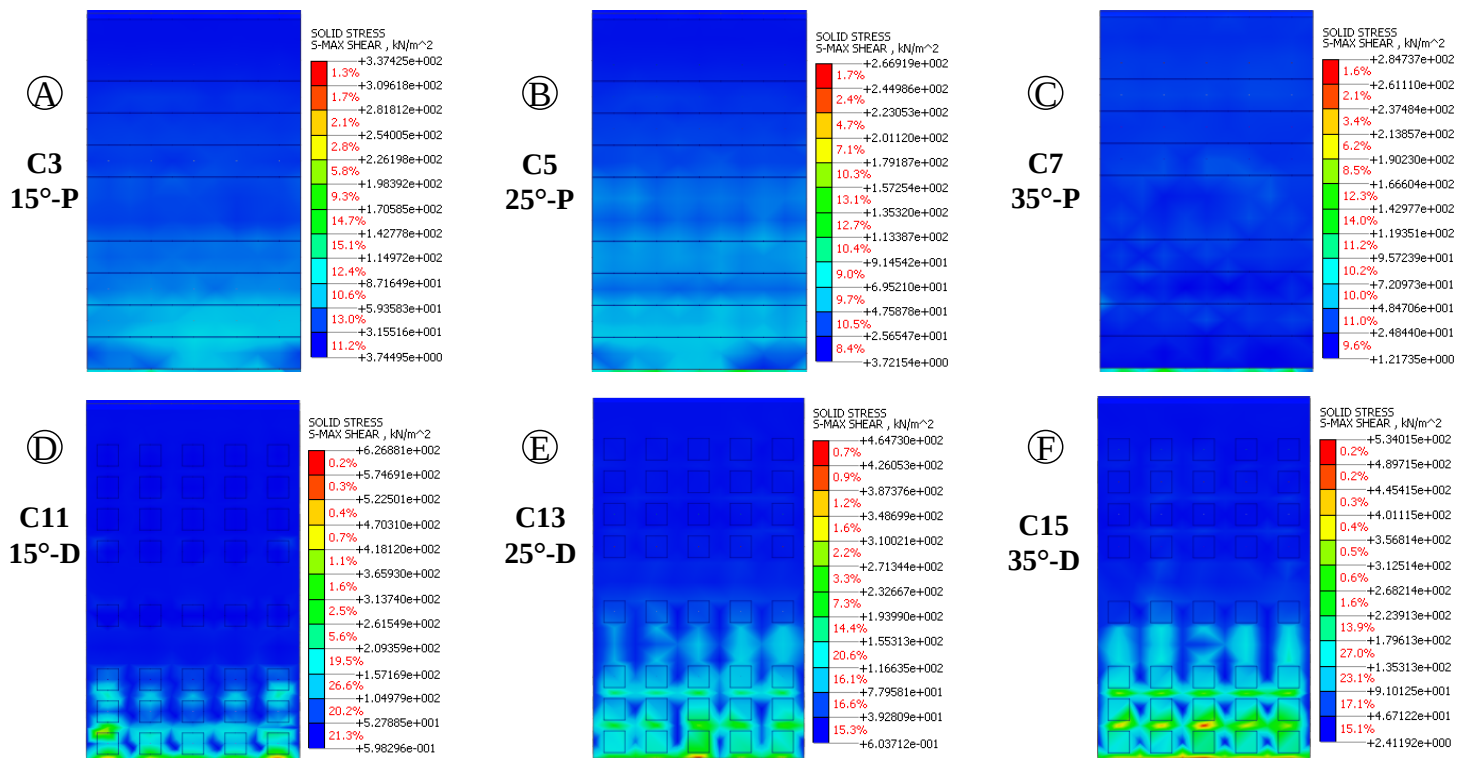


Fig. 10. Esfuerzos cortantes para los casos de análisis representativos con diferentes ángulos de inclinación. A) 15° Pantalla, B) 25° Pantalla, C) 35° Pantalla, D) 15° Dados, E) 25° dados, F) 35° Dados.

En la Fig.10 se observa que, para el caso de la pantalla continua como superficie de apoyo, los esfuerzos cortantes se distribuyen mucho mejor en la superficie del muro. Con una pequeña concentración de esfuerzos en el tercio inferior del muro, más concretamente en las filas de anclajes 6,7 y 8. Estas concentraciones se van dispersando a medida en que se aumenta el ángulo de inclinación de los anclajes. Por parte de los dados como superficie de apoyo se puede apreciar la misma concentración de esfuerzos, pero con una mayor intensidad y se aprecia que para mayores ángulos de inclinación se intensifican los esfuerzos cortantes en las filas de anclajes 6,7 y 8.

7.2. INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS ANCLAJES

Para evaluar la incidencia de la distribución de los anclajes se realizaron 3 distribuciones de anclajes adicionales a la distribución original que encontramos en el caso de estudio. La geometría de las distintas distribuciones se representa en la Fig.11, cuyas unidades están dadas en metros. Para cada variante de distribución se buscó mantener el número de anclajes iniciales (40), pero, para el caso de la distribución a “tresbolillo original” fue inevitable la sustracción de 4 anclajes para mantener la correcta disposición de estos, con su particular forma triangular de alineación.

Tabla. 4. Casos de análisis para diferentes distribuciones de anclajes

CASOS PANTALLA	DISTRIBUCIÓN	CASOS DADOS	DISTRIBUCIÓN
C17 (Caso de estudio)	Original	C21	Original
C18	Equidistante	C22	Equidistante
C19	Tresbolillo Original	C23	Tresbolillo Original
C20	Tresbolillo Modificado	C24	Tresbolillo Modificado

Como se aprecia en la Fig. 11, la distribución “equidistante” mantiene una separación vertical constante para cada nivel de anclaje, la distribución a “tresbolillo original” conserva la separación entre anclajes expuesta en el caso de estudio, mientras que la distribución a “tresbolillo modificado” sugiere adecuar el espaciamiento entre los anclajes con la finalidad de evitar la eliminación de ninguno de los 40 anclajes iniciales del caso de estudio.

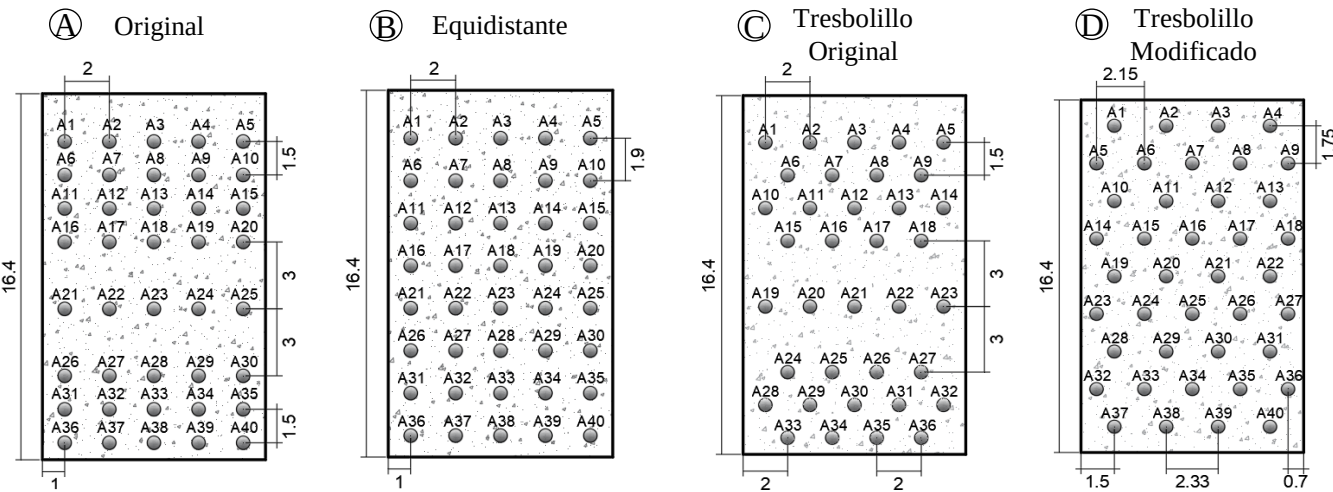


Fig. 11. Distribuciones de anclajes propuestas, A) Distribución inicial del sistema, B) Distribución propuesta con los anclajes equidistantes, C) Distribución propuesta con los anclajes a tresbolillo y manteniendo la separación original, D) Distribución a tresbolillo con modificaciones en la separación de los anclajes.

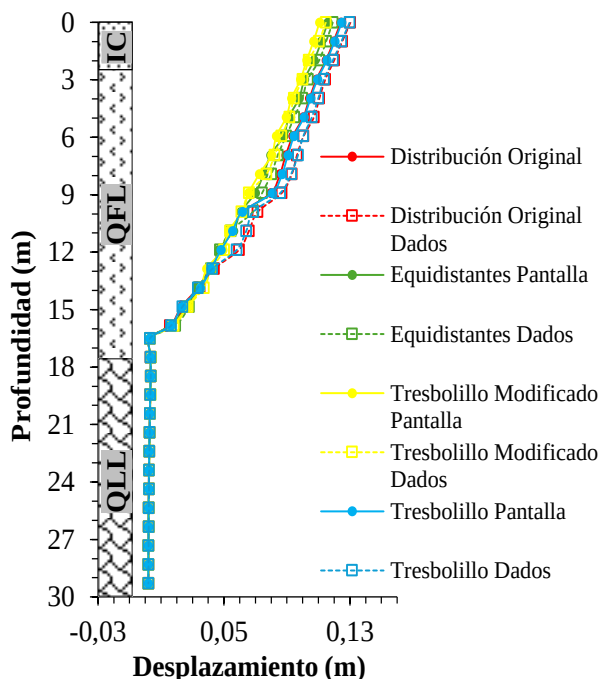


Fig. 12. Desplazamientos obtenidos para diferentes distribuciones de anclajes.

En la Fig.13A se puede observar que el modelo con la distribución a “tresbolillo original” tanto en pantalla como en dados, mostró un comportamiento similar respecto a las condiciones originales. Arrojando valores de desplazamientos que difieren por menos de 1mm siendo mejor el modelo original; sin embargo, considerando el costo que acarrea la construcción de 4 anclajes adicionales, podríamos decir que esta distribución es eficiente y además optimiza costos respecto a una distribución tradicional en cuadrícula coincidiendo con lo observado por Jalali Moghadam en [6].

Por otra parte, el modelo equidistante y el modelo a tresbolillo modificado tuvieron un comportamiento similar siendo notable su mejoría respecto al modelo original, exactamente se disminuyeron los desplazamientos en un 6,63% y 10,89%, respectivamente, en la zona más crítica (Parte superior del talud), difiriendo estas dos últimas por solo 5 mm. Donde el mejor de todos los modelos es el tresbolillo modificado, el cual presenta 4,57% menos desplazamientos con respecto al modelo con la distribución equidistante esto se debe a que en general en esta disposición, los anclajes quedan más cercanos unos a otros y por tanto hay una mejor distribución de esfuerzos correspondiendo a la teoría de distribución expuesta en [6].

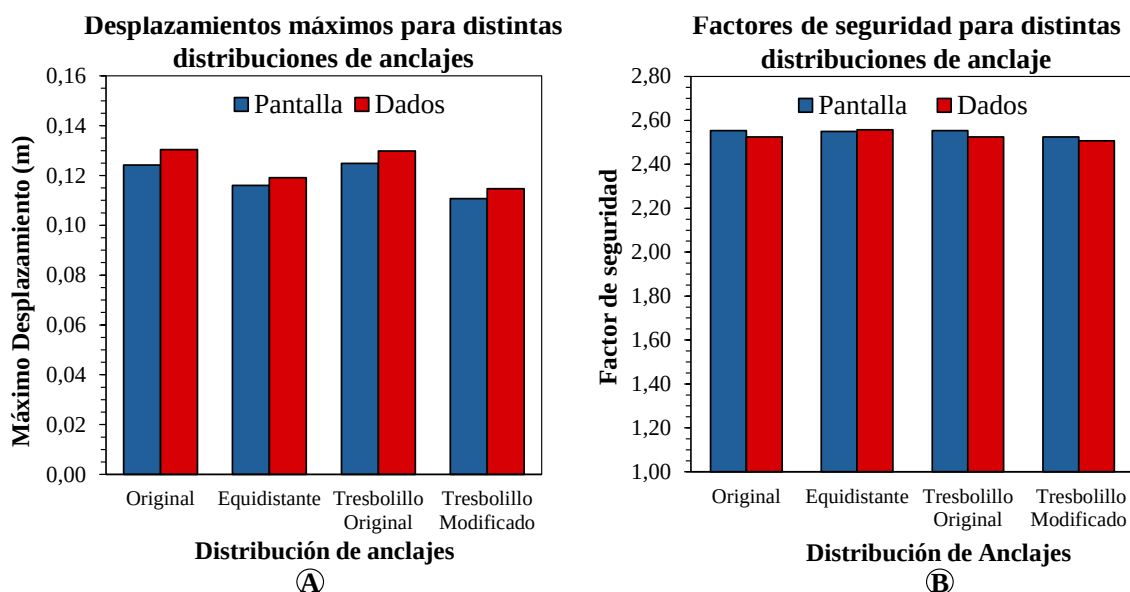


Fig. 13. Comparativa pantalla vs dados, A) Desplazamientos máximos para diferentes distribuciones de anclajes, B) Factores de seguridad para diferentes distribuciones de anclajes.

Para las distintas distribuciones de anclajes consideradas en el análisis, se encontró una vez más que los desplazamientos obtenidos en los casos que poseen pantalla como superficie de apoyo son menores a los obtenidos en los casos cuya superficie de apoyo son dados en concreto. Por otra parte, al considerar los factores de seguridad (Ver fig.13B) se puede apreciar datos similares, con valores sobresalientes tanto para ambas estructuras de apoyo como para sus distribuciones de anclaje, lo cual evidencia la importancia de los sistemas de contención anclados como lo expresa S. Cheng en [10].

En la Fig.13 se puede observar que la distribución a tresbolillo original se acerca bastante a las condiciones del modelo original, pues estos ofrecen datos de desplazamiento y factores de seguridad muy similares aun cuando la distribución a tresbolillo original cuenta con 4 anclajes menos en su configuración

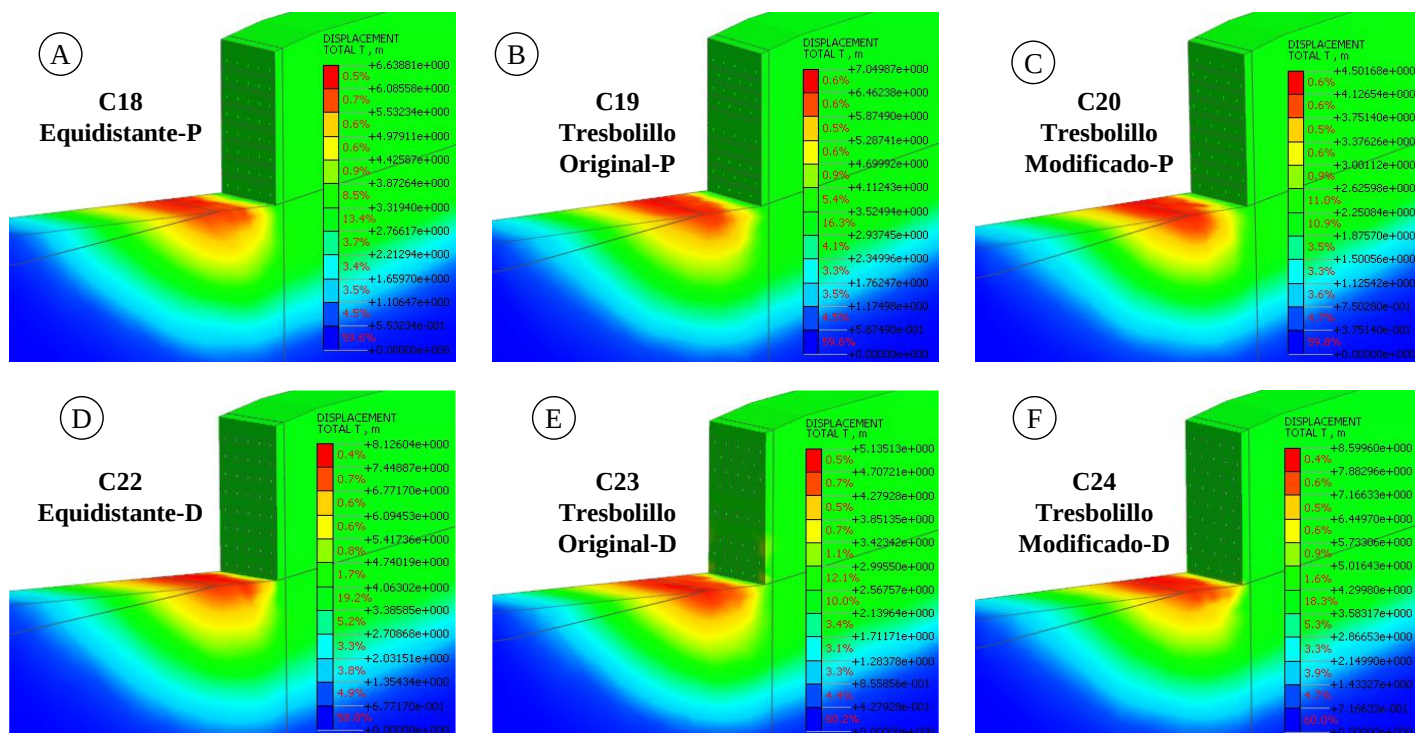


Fig. 14. Desplazamientos totales para los casos de análisis representativos con diferentes distribuciones de anclajes.
A) Equidistante-pantalla, B) A tresbolillo original-Pantalla, C) A tresbolillo modificado-Pantalla, D) Equidistante-Dados,
E) A tresbolillo original-Dados, F) A tresbolillo modificado-Dados.

En la Fig.14 se pueden apreciar de forma gráfica los desplazamientos totales en el sistema para las distintas distribuciones de anclajes propuestas. No se aprecian diferencias significativas entre los casos de análisis debido que la variación en sus desplazamientos fue del margen de menos de 1 cm de variación, como se puede apreciar en la Fig.13A, sin embargo, se hace notoria la disminución de los desplazamientos para el modelo a tresbolillo modificado, el cual muestra el mejor comportamiento respecto a los desplazamientos y un factor de seguridad más que aceptable de 2,5 aproximadamente.

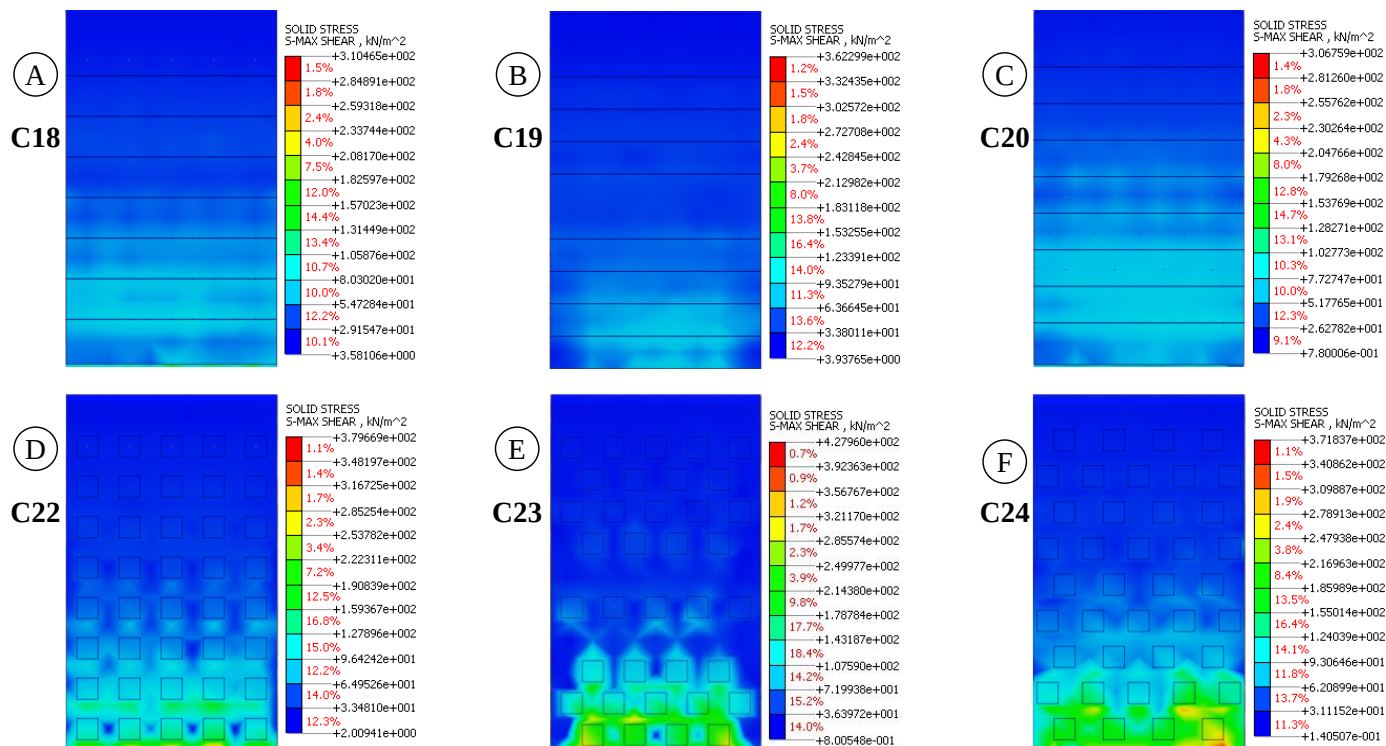


Fig. 15. Esfuerzos cortantes para los casos de análisis representativos con diferentes distribuciones de anclaje.
 A) Equidistante-pantalla, B) A tresbolillo original-Pantalla, C) A tresbolillo modificado-Pantalla, D) Equidistante-Dados,
 E) A tresbolillo original-Dados, F) A tresbolillo modificado-Dados.

La Fig.15 presenta la concentración de esfuerzos cortantes del suelo en contacto con la superficie de apoyo, en la figura se puede apreciar que la concentración de esfuerzos se hace más notoria en las áreas circundantes a la posición de los anclajes, de la misma forma en la que una viga con cargas distribuidas padece los mayores esfuerzos cortantes cerca a sus apoyos. En todos los casos, las líneas inferiores de anclajes son las que más esfuerzos cortantes sufren debido a la resistencia que ejercen contrarrestando la superficie potencial de falla, lo cual se hace más evidente en los casos en donde se utiliza a los dados como superficie de apoyo. Se puede observar que en el caso de los dados en concreto los esfuerzos cortantes se localizan en la región inferior de la excavación, mientras que, para los casos con pantalla, se evidencia una mejor distribución de los esfuerzos y como consecuencia un mejor comportamiento frente a los dados en concreto, tal y como lo propone Haiyang Zhuang en [13].

7.3. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DEL ANCLAJE

Para evaluar la incidencia en la longitud del anclaje, se consideró la longitud del anclaje libre en más un metro (+1m) para cada caso de análisis, hasta conseguir el aumento máximo de longitud propuesto que equivale a 5 m adicionales a la longitud del modelo inicial (Ver Tabla.4). Como se aprecia en la Fig.16, este parámetro no fue un factor de alta incidencia en el sistema de contención debido a que el diseño original del modelo respeta en todo momento la superficie potencial de falla como se enuncia en la guía de sistemas de contención anclados [9]. Condición que es superada por la longitud del anclaje libre en 3,28 m por el modelo original del sistema de contención (Ver Fig.17).

En la siguiente tabla se encuentran descritos los 22 casos de análisis resultantes de las variaciones aplicadas al modelo original en donde se aumenta tanto la longitud efectiva del anclaje libre como su bulbo en un +1 metro en cada caso de análisis.

Tabla. 5. Casos de análisis para distintas longitudes de anclaje libre y bulbos.

CASOS PANTALLA	DISTRIBUCIÓN	CASOS DADOS	DISTRIBUCIÓN
C25	Original	C36	Original
C26	+1m Anclaje Libre	C37	+1m Anclaje Libre
C27	+2m Anclaje Libre	C38	+2m Anclaje Libre
C28	+3m Anclaje Libre	C39	+3m Anclaje Libre
C29	+4m Anclaje Libre	C40	+4m Anclaje Libre
C30	+5m Anclaje Libre	C41	+5m Anclaje Libre
C31	+1m Bulbo	C42	+1m Bulbo
C32	+2m Bulbo	C43	+2m Bulbo
C33	+3m Bulbo	C44	+3m Bulbo
C34	+4m Bulbo	C45	+4m Bulbo
C35	+5 Bulbo	C46	+5 Bulbo

Debido a las pocas variaciones con respecto a los desplazamientos y al factor de seguridad resultantes de los casos de estudio correspondientes a la longitud del anclaje, se optó por graficar únicamente los casos más representativos como se puede apreciar en la Fig.16.

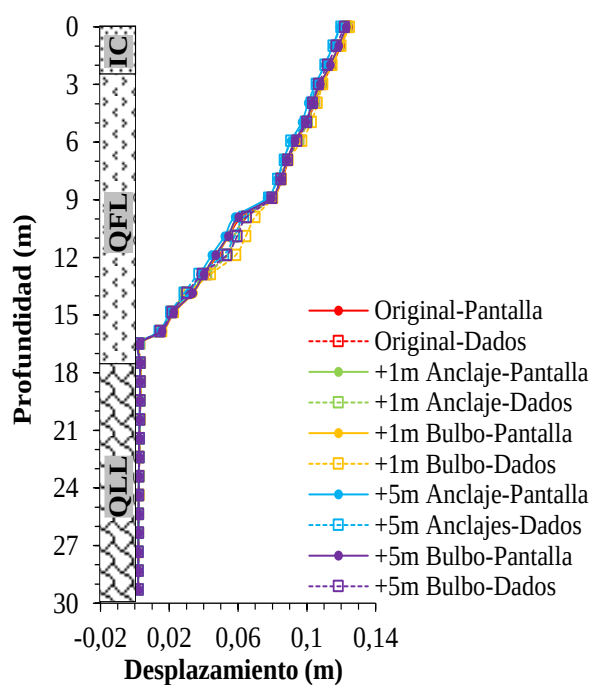


Fig. 16. Desplazamientos obtenidos para diferentes longitudes de anclaje libre y bulbo.

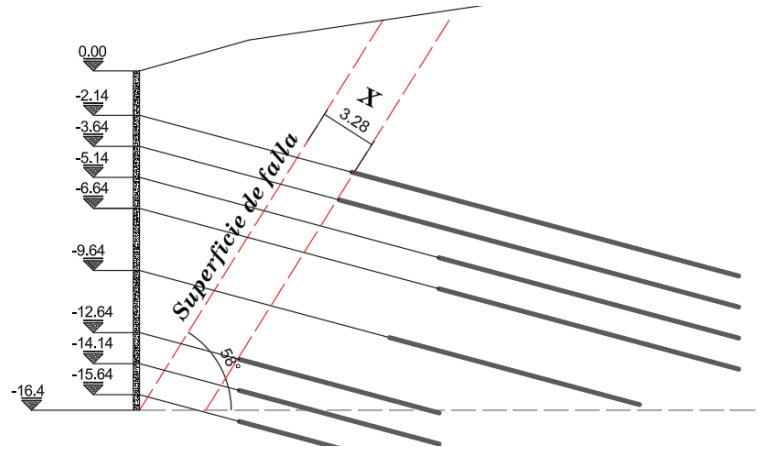


Fig. 17. Superficie de falla para el caso de estudio.

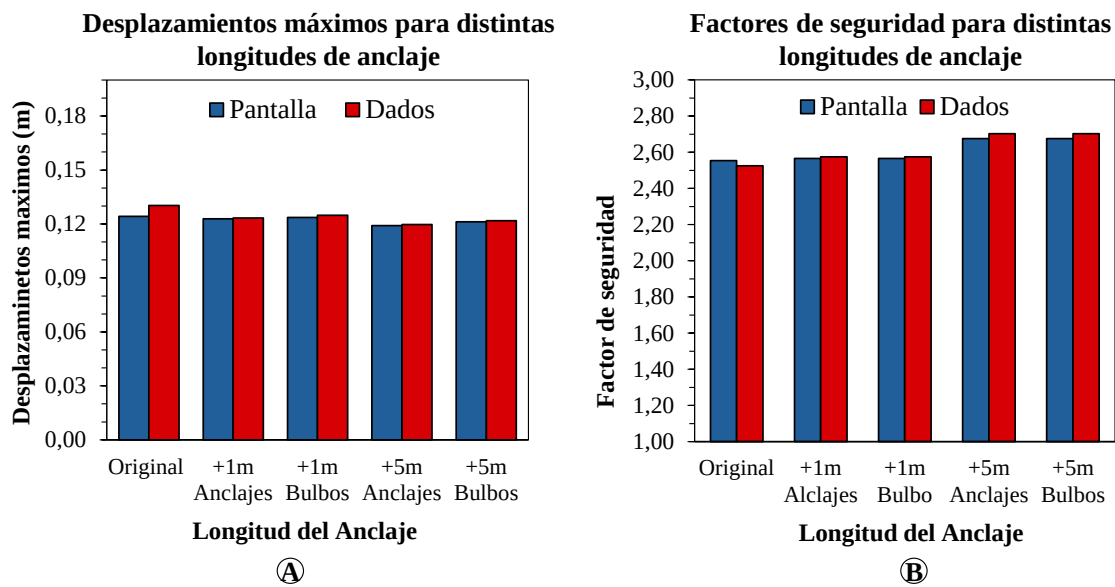


Fig. 18. Comparativa pantalla vs dados. A) Desplazamientos máximos para diferentes longitudes de anclaje y bulbo, B) Factores de seguridad para diferentes longitudes de anclaje y bulbo.

Es posible evidenciar una mejoría en términos de desplazamientos a medida que se aumenta la longitud libre del anclaje; dicha mejoría corresponde a 0.5 cm desde el modelo original hasta más 5 metros de longitud libre del anclaje (Ver Fig.18A), por consiguiente, podría considerarse una mejora imperceptible considerando además que los costos de perforación, del mismo cable y mano de obra en general sí se verían afectados de manera negativa realizando dicha tarea. Así mismo, se puede apreciar una tendencia gradual y proporcional en cada uno de los casos, es decir, a mayor longitud, menores desplazamientos, sin embargo, cabe resaltar una vez más que dichas mejoras no pasan del orden de las 18 micras, es decir, 0.018 mm de entre cada metro de anclaje libre adicional en promedio.

Por último, se pudo apreciar que la incidencia de los parámetros correspondientes a la longitud de los anclajes y la longitud de bulbos es despreciable siempre y cuando estos cumplan con la longitud mínima necesaria para superar la superficie de falla (Ver Fig.17) tal como lo indica P.J. Sabatini, D.G. Pass y R.C Bachus en [9].

8. CONCLUSIONES

Se concluye que el ángulo de inclinación de los anclajes tiene una influencia significativa en los desplazamientos del sistema de contención: a mayor ángulo, mayores serán los desplazamientos observados. Por ello, se recomienda evitar ángulos superiores a 25° y considerar un rango de inclinación entre 10° y 25° para lograr un balance óptimo entre bajas deformaciones y buenos factores de seguridad, especialmente en proyectos con limitaciones constructivas.

Se concluyó que la distribución de anclajes en tresbolillo es la más eficaz para este tipo de sistemas de contención, ya que presenta los menores desplazamientos y un factor de seguridad comparable al de otras configuraciones evaluadas. Esta disposición no solo supera de manera consistente el desempeño de la disposición en cuadrícula tradicional, sino que además mantiene un rendimiento equivalente con un menor número de anclajes. Esto permite reducir los costos de implementación sin comprometer la estabilidad y efectividad del sistema.

En cuanto a la longitud del anclaje libre y del bulbo, se concluyó que su influencia es despreciable, siempre que se cumpla con la longitud mínima requerida para superar la superficie de falla. Las variaciones de desplazamiento y factor de seguridad entre los distintos casos analizados fueron menores al 1%, y la diferencia máxima fue de 4.11% en desplazamientos y 4.57% en el factor de seguridad entre los mejores y peores escenarios. Sin embargo, se puede afirmar que una mayor longitud del anclaje tiende a reducir los desplazamientos y a incrementar el factor de seguridad.

Finalmente, se observó que el uso de una pantalla continua de concreto como superficie de apoyo ofrece ventajas significativas frente a los dados de concreto. Su continuidad estructural mejora la respuesta ante esfuerzos, minimizando las fallas locales y reduciendo los desplazamientos del sistema de contención.

9. REFERENCIAS

- [1] Jaime Suárez Díaz, “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales,” 1998.
- [2] R. Y. Liang, Y. X. Feng, S. J. Vitton, and S. Lee, “Analytical Study of Active and Passive Ground Anchors,” *Soils and Foundations*, vol. 38, no. 3, pp. 13–26, Sep. 1998, doi: 10.3208/SANF.38.3_13.
- [3] R. Inc, “Application of the Finite Element Method to Slope Stability,” 2001.
- [4] A. Szavits Nossan, I. Sokolić, and G. Plepelić, “Design of anchored retaining structures by numerical modelling,” in *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 2009, pp. 1381–1384. doi: 10.3233/978-1-60750-031-5-1381.
- [5] G. F. Laceras Torres, “SIMULACIÓN NUMÉRICA DE OBRAS PARA LA ESTABILIZACIÓN SUPERFICIAL DE TALUDES,” 2015.
- [6] M. J. Moghadam, A. Zad, N. Mehrannia, and N. Dastaran, “Experimental study on the performance of plate anchor retaining walls,” *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 19, no. 3, pp. 128–140, May 2019, doi: 10.1680/jphmg.17.00040.
- [7] J. Maleki, A. Pak, M. Yousefi, and N. Aghakhani, “A comprehensive FE study for design of anchored wall systems for deep excavations,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 122, p. 104340, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.TUST.2021.104340.
- [8] P. Vélez Velásquez, “Estructuras de Contención Construidas a partir de Barras de Acero o Tubos Inyectados,” 2018.
- [9] P. J. Sabatini, D. G. Pass, and R. C. Bachus, “GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR NO. 4 Ground Anchors and Anchored Systems 4. Report Date 13 Type of Report and Period Covered Unclassified,” 1999.
- [10] S. Chen, Z. Yang, W. Zhang, L. Li, Y. Zheng, and Y. Yuan, “Numerical Simulation of the Stability of a Cutting Slope and Study on Its Reinforcement Scheme,” 2022, doi: 10.1155/2022/5306923.
- [11] Y. M. Cheng, “Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis,” *Comput Geotech*, vol. 30, no. 3, pp. 255–267, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0266-352X(03)00012-0.
- [12] H. Kong, M. Dong, X. Cao, S. Lin, S. X. Zhao, and H. Zheng, “Global analysis approach of stability of deep foundation pit slopes reinforced by underground diaphragm walls and prestressed anchor cables,” *Comput Geotech*, vol. 163, p. 105744, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.COMPGEO.2023.105744.
- [13] H. Zhuang, R. Wang, P. Shi, and G. Chen, “Seismic response and damage analysis of underground structures considering the effect of concrete diaphragm wall,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 116, pp. 278–288, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2018.09.052.