

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

Neiva, Huila

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad: Neiva

El (Los) suscrito(s):

Juan David Trujillo Artunduaga, con C.C. No. 1075314681,

María Kamila Camargo Calderón, con C.C. No. 1075316328,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Análisis del comportamiento de un talud con un sistema de estabilidad de micropilotes sin viga cabezal con el programa MIDAS GTS NX presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de Ingeniero Civil;

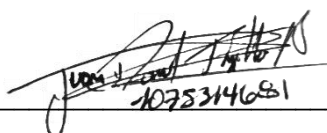
Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

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

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

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:  1075314681

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.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN TALUD CON UN SISTEMA DE ESTABILIDAD DE MICROPILOTES SIN VIGA CABEZAL CON EL PROGRAMA MIDAS GTS NX.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Juan David	Trujillo Artunduaga
María Kamila	Camargo Calderón

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

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

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:** 2024 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 26

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

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

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 3

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

MATERIAL ANEXO: 1 Anexos

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Micropilotes</u>	<u>Micropiles</u>
2. <u>Talud</u>	<u>Slope</u>
3. <u>Estabilidad de taludes</u>	<u>Slope stability</u>
4. <u>Midas GTX</u>	<u>Midas GTX</u>
5. <u>Modelo numérico</u>	<u>Numerical model</u>

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Existen múltiples técnicas para alcanzar la estabilidad en taludes, siendo el uso de micropilotes una de las estrategias más habituales para su estabilización o mejora. Este estudio se centró en la evaluación numérica de taludes reforzados con micropilotes, implementando un modelo de elementos finitos en tres dimensiones a través del software MIDAS GTS NX. Dicho modelo fue verificado con datos experimentales de casos documentados, particularmente un talud de arena limosa estabilizada a escala real. Se empleó un análisis paramétrico, para investigar la influencia de la posición, inclinación, longitud y diámetro de los micropilotes en el factor de seguridad. Los resultados revelaron que la modelación en 3D ofrece una perspectiva más detallada del desafío que representa la estabilidad de los taludes. Se identificó la posición y la inclinación más favorables para los micropilotes, adicionalmente, se identificó que aumentar la longitud más allá de un valor específico, no contribuye de manera considerable a la estabilidad, y que el diámetro de estos tiene un menor impacto en el factor de seguridad de los taludes reforzados.

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

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

There are multiple techniques to achieve stability on slopes, with the use of micropiles being one of the most common strategies for stabilization or improvement. This study focused on the numerical evaluation of slopes reinforced with micropiles, implementing a three-dimensional finite element model through the MIDAS GTS NX software. This model was verified with experimental data from documented cases, particularly a real scale stabilized silty sand slope. A parametric analysis was used to investigate the influence of the position, inclination, length and diameter of the micropiles on the safety factor. The results revealed that 3D modeling offers a more detailed perspective on the challenge of slope stability. The most favorable position and inclination for the micropiles was identified. Additionally, it was identified that increasing the length beyond a specific value does not contribute considerably to the stability, and that their diameter has a lesser impact on the factor. safety of reinforced slopes.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Carlos Rodolfo Marín Uribe

Firma: 

Nombre Jurado: Robinson Andrés Garzón Leiva

Firma: 

Nombre Jurado: Mauricio Herrera Rodríguez

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 del comportamiento de un talud con un sistema de estabilidad de micropilotes sin viga cabezal con el programa MIDAS GTS NX.

Jackson A. Gil-Hernández¹, Juan D. Trujillo Artunduaga², and María K. Camargo Calderón³

¹ *Profesor asistente, Universidad Surcolombiana, Programa Ingeniería Civil, Neiva, Colombia.*

E-mail: jackson.gil@usco.edu.co

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

E-mail: u20162153503@usco.edu.co

³ *Estudiante, Universidad Surcolombiana, Programa Ingeniería Civil, Neiva, Colombia.*

E-mail: u20162152541@usco.edu.co

1. Resumen

Existen múltiples técnicas para alcanzar la estabilidad en taludes, siendo el uso de micropilotes una de las estrategias más habituales para su estabilización o mejora. Este estudio se centró en la evaluación numérica de taludes reforzados con micropilotes, implementando un modelo de elementos finitos en tres dimensiones a través del software MIDAS GTS NX. Dicho modelo fue verificado con datos experimentales de casos documentados, particularmente un talud de arena limosa estabilizada a escala real. Se empleó un análisis paramétrico, para investigar la influencia de la posición, inclinación, longitud y diámetro de los micropilotes en el factor de seguridad. Los resultados revelaron que la modelación en 3D ofrece una perspectiva más detallada del desafío que representa la estabilidad de los taludes. Se identificó la posición y la inclinación más favorables para los micropilotes, adicionalmente, se identificó que aumentar la longitud más allá de un valor específico, no contribuye de manera considerable a la estabilidad, y que el diámetro de estos tiene un menor impacto en el factor de seguridad de los taludes reforzados.

Palabras claves: Micropilotes, Talud, Estabilidad de taludes, Midas GTX, Modelo numérico.

2. Introducción

La estabilidad de talud es esencial en el desarrollo de cualquier proyecto de infraestructura, en las diferentes técnicas de estabilización podemos encontrar el uso de anclajes, pernos, muros de contención. Dentro de estos sistemas de estabilización se resalta el uso de los sistemas de micropilotes, los cuales han demostrado ser altamente eficaces bajo diversas condiciones de carga [1]. Los micropilotes son elementos estructurales conocidos como pilotes de reemplazo de diámetro reducido (generalmente menor a 300mm) [2]. Su construcción implica la perforación de un pozo, seguida de la inserción del acero de refuerzo y, finalmente, el llenado del pozo con lechada [3].

La diversidad de equipos disponibles para la instalación de micropilotes, sumada a la facilidad de construcción de estos elementos en zonas de acceso restringido, ha convertido a los micropilotes en el método predominante para el refuerzo y acondicionamiento sísmico de cimientos [4].

Debido a la topografía agreste en Colombia, los Fenómenos de Remoción en Masa (FRM) que implican el desplazamiento de masas de suelo o roca son comunes. Estos incluyen caídas libres de roca, deslizamientos

traslacionales y rotacionales, flujos de tierra, detritos o lodos, y situaciones combinadas o complejas como los hundimientos-flujos de tierras y los deslizamientos múltiples retrogresivos [5].

Según el análisis de la gestión de riesgo de desastres en Colombia por parte del Global Facility for Disaster Reduction and Recovery [6], alrededor del 86% del territorio nacional está expuesto a una amenaza sísmica alta e intermedia [7], del cual el 18% aproximadamente se encuentra en zona de alta amenaza por movimiento de masa.

Para prevenir los colapsos causados por Fenómenos de Remoción en Masa (FRM), se diseñan sistemas de protección y estabilización que salvaguardan a las personas y propiedades circundantes. La aplicación del sistema de micropilotes contribuye a mejorar la capacidad de carga y la resistencia de suelos granulares en la base del talud natural. Este sistema es especialmente útil en taludes donde los sistemas de drenaje no son suficientes para evitar la acumulación de agua en su base, lo que disminuye la resistencia del suelo y aumenta el riesgo de deslizamiento [8]. Además, debido su diámetro pequeño, en el diseño de cimentaciones se tiende a ignorar su capacidad de punta, considerando la fricción entre el suelo y la lechada como el principal mecanismo de transferencia de carga ante cargas axiales.

En lo que respecta a la estabilidad de taludes, se ha demostrado que el uso de micropilotes es más eficiente que el de los pilotes antideslizantes. La razón radica en que la construcción de micropilotes no requiere maquinaria pesada y, además, pueden colocarse con facilidad en áreas de acceso complicado, como los taludes en regiones montañosas con pendientes pronunciadas [3].

En el esfuerzo por comprender el comportamiento de los taludes reforzados con micropilotes, varios investigadores han hecho contribuciones significativas para entender los mecanismos de transferencia de carga entre los micropilotes y el suelo en lo que respecta a la estabilidad de los taludes.

A la fecha, diferentes autores han investigado acerca del comportamiento de los taludes con diferentes sistemas de estabilización, entre ellos Sun, Wang y Zhao [9], plantearon un método no lineal simple para analizar la estabilidad de un talud homogéneo reforzado con micropilotes en un proyecto de Beijing, China. La metodología consistió en reducir la resistencia al corte, en la que el comportamiento del suelo se describe utilizando el criterio de Mohr-Coulomb y los micropilotes se modelan como elementos de pilotes en 3D. Los análisis de estabilidad se realizaron con base a la posición óptima del micropilote, la profundidad de empotramiento y la longitud del truncamiento.

Otros autores han estudiado el comportamiento del efecto de los micropilotes de una y dos hileras en la estabilidad de talud a escala real. Xueling Liu, Jinkai Yan, Bin Tong y Lei Liu [10] propusieron una metodología basada en dos configuraciones de prueba diferentes a gran escala. Analizaron el momento de flexión a lo largo de los micropilotes, el modo de falla y la condición de fuerza.

Un estudio realizado en Egipto por Abdelaziz, Hafez, y Hussein [11] se investigó la estabilidad de taludes con pilotes, utilizando el método de elementos finitos. Crearon y validaron un modelo de elementos finitos basado en datos experimentales. Este modelo 3D se empleó para analizar cómo distintos parámetros afectan el factor de seguridad (F.S.) de los taludes. Concluyeron que la posición ideal del pilote se encuentra en la mitad de los taludes para alcanzar el mayor factor seguridad. Rogger Danny Salvatierra Torres [12] se centró en analizar la estabilidad de los taludes mediante el método del equilibrio límite. Durante este

estudio, identificó factores que afectan la estabilidad, como aspectos geológicos, geométricos, geotécnicos, sismos y precipitaciones pluviales. El objetivo principal fue diseñar medidas preventivas para evitar deslizamientos. Como conclusión, se destacó que los factores geométricos son los más influyentes en términos de estabilidad.

En su estudio Won, K. You, S. Jeong y S. Kim [13] , realizaron un modelo de un talud reforzado con una hilera de micropilotes en el cual se evaluó la influencia del espaciado respecto a la superficie de deslizamiento crítica con base a la velocidad de deformación cortante y el modo de falla. Según los datos obtenidos comprobaron que cuando el espaciamiento de los pilotes es menor la superficie de deslizamiento crítica es poco profunda. En base a estos hallazgos, se concluyó que la posición óptima de los pilotes se encuentra entre la mitad del talud y el centro de la superficie crítica de deslizamiento del talud sin pilote.; Azucena del Pilar Botello [14] propuso una investigación para analizar el comportamiento de los micropilotes cuando se usan para estabilizar terraplenes en laderas medias y como muros de contención. El estudio profundizó en la influencia de factores como la inclinación y la densidad de los micropilotes, así como el efecto que tiene la inyección de estos en el terreno circundante.

Otros investigadores han realizado comparaciones numéricas utilizando el código FLAC 3D. En este contexto, el estudio de Won, You, Jeong, y Kim [15] se centró en analizar un sistema de pilotes en pendiente. El objetivo principal fue determinar un factor de seguridad en un talud reforzado con pilotes, utilizando una técnica de reducción de la resistencia al corte a través de una rutina interna (FISH). Además, se llevaron a cabo análisis acoplados para la estabilización de pilotes en un talud, considerando tanto la respuesta del pilote como la estabilidad del talud.

Si bien se han realizado diversas investigaciones sobre la estabilidad de taludes mediante el uso de micropilotes, es crucial para la seguridad en proyectos de ingeniería civil comprender los mecanismos de falla y aplicar cimentaciones adecuadas para garantizar eficiencia y seguridad. Por lo anterior, este proyecto evaluó la influencia de la variación de diferentes parámetros en un tipo de cimentación y sus efectos en el comportamiento del sistema propuesto. Para realizar este estudio se realizó un análisis paramétrico con ayuda de un modelo de elementos finitos.

3. Caso de estudio

Según el estudio realizado por Ömer Bozok [16] y Andrew Z. Boeckmann [17], se tomó una muestra de suelo de una excavación cerca del río Missouri, en la que se empleó un sistema de contención compuesto por micropilotes discontinuos. Con el objetivo de caracterizar las propiedades del suelo, se llevaron a cabo pruebas en el laboratorio de ingeniería geotécnica de la Universidad de Missouri-Columbia. Estas pruebas se basaron en ensayos de granulometría, proctor estándar y reducido, así como corte directo y triaxial. Todos estos ensayos se realizaron en el área específica de la muestra.

Figura 1: Construcción del modelo físico para los ensayos.



Fuente: Modificado de Andrew Z. Boeckmann [17].

La figura 1 ilustra el proceso de montaje del sistema, que comenzó con la expansión de la muestra del suelo. Posteriormente, se transportó al área de ensayo mediante un minicargador y se distribuyó en capas uniformes. Cada capa se compactó para formar la pendiente del talud, resultando en el modelo de pendiente listo para realizar las pruebas.

Figura 2: Fotografía de la construcción del sistema de contención para el modelo físico.



Nota: La figura (e) representa un micropilote recuperado del modelo experimental.

Fuente: Modificado de Andrew Z. Boeckmann [17].

De acuerdo con la figura 2, se llevaron a cabo las siguientes acciones para el proceso de instalación del elemento de refuerzo: perforación del talud (Figura 2-a), verificación de la inclinación y longitud de la perforación (Figura 2-b), llenado parcial de la abertura con lechada (Figura 2-c) y, por último, una inserción de tubería de acero mientras se vibra para eliminar las burbujas de aire en el concreto (Figura 2-d). Al finalizar la prueba, se recuperaron algunos de los micropilotes usados (Figura 2-e).

4. Pruebas de laboratorio

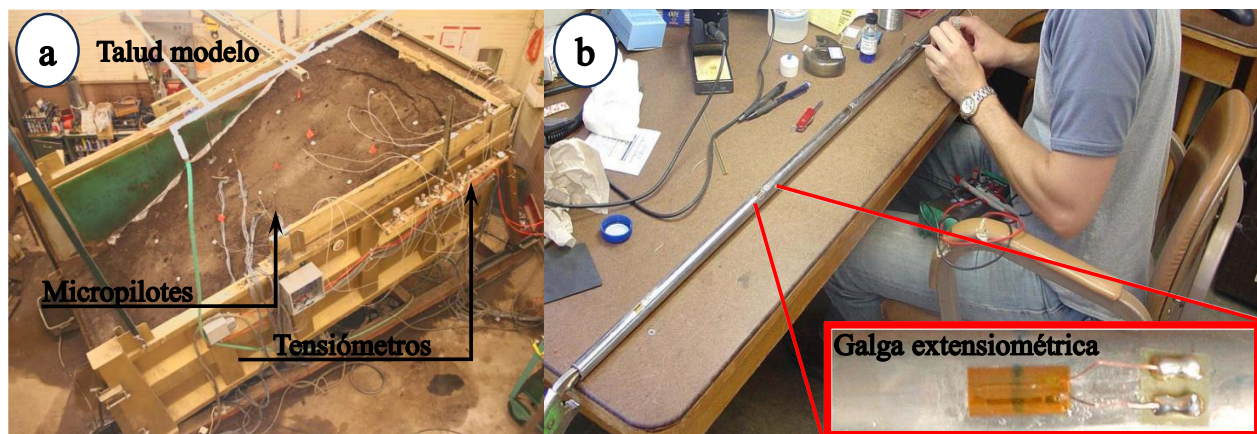
Este estudio se basó en el modelo experimental realizado por Andrew Z. Boeckmann [17] en la universidad de Missouri-Columbia. El ensayo lo componen 6 prototipos de micropilotes, inyectados en un talud realizado en laboratorio. El modelo de refuerzo utilizado para todas las pruebas es un micropilote de 3,81cm (1,5 pulgadas) de diámetro nominal perforado e inyectado por gravedad, reforzado con una tubería de acero de 1,90cm (0,75 pulgadas) de diámetro con un espesor de pared de 0,254cm (0,1 pulgadas).

Además, cuenta con un sistema de precisión que mide la presión de poros en lugares determinados para establecer los esfuerzos efectivos en lugares seleccionados; desplazamientos de pendientes para monitorear la estabilidad y la superficie de falla; y deformación en los elementos de refuerzo para determinar la transferencia de la carga en los micropilotes a medida de la realización de la prueba. Así mismo, se utilizaron columnas de marcado para ayudar a identificar la superficie de falla durante la evaluación forense de los taludes del modelo.

Se utilizaron galgas extensiométricas del tipo de resistencia de lámina eléctrica en miembros seleccionados para medir la deformación del elemento, a partir de las cuales se determinaron las tensiones del miembro. Se conectaron **cinco pares de calibres** a la tubería de acero utilizada en los micropilotes modelo a intervalos equidistantes a lo largo del micropilote que se instalaría debajo de la cara del talud modelo.

El sistema de recolección de datos consta de tres multiplexores y una placa de circuito conectada a un software de adquisición de datos que opera una computadora. Las lecturas de galgas extensiométricas (Figura 3-B) para tres elementos de refuerzo instrumentados se transfieren a través de dos de los multiplexores, y cada galga utiliza 4 canales. El otro multiplexor acepta lecturas de los medidores de presión de poro y desplazamiento de pendiente, y cada medidor usa 2 canales. Se instalaron 9 a 10 tensiómetros (Figura 3-A) en cada pendiente del modelo; los desplazamientos de pendiente se midieron utilizando extensómetros de cable que consistían en pequeños anclajes unidos a líneas de monofilamento colocadas a través de los modelos y conectadas a potenciómetros giratorios para registrar el movimiento.

Figura 3: Fotografía de la construcción del sistema de contención para el modelo físico.



5. Caracterización de materiales

Para caracterizar los materiales, Andrew Z. Boeckmann [17], realizó diversas pruebas de laboratorio, incluyendo un análisis granulométrico, ensayos de compactación según el estándar Proctor en su versión normal y reducida, así como el ensayo de corte directo drenado.

Los ensayos realizados clasificaron el suelo como arena limosa (SM), con un nivel de compactación del 11% según los ensayos de Proctor modificado [18]. El tamaño máximo de partícula se determinó en 4.7 mm. Además, se caracterizó este tipo de suelo por su contenido de finos, que alcanzó un 19%, un índice de plasticidad de 9, un límite de plasticidad de 14 y un límite líquido de 23. En la tabla 1, se realiza el resumen de las características del suelo:

Tabla 1: Propiedades del material de suelo para el modelo numérico.

Parámetros	Valores
E	34 Mpa
V	0.25
Peso máximo drenado	18 kN/m ³

Parámetros	Valores
Angulo interno de fricción drenado	33
Cohesión	3.4 kPa
Tipo de modelo	Mohr-Coulomb
Tipo de drenado	Drenado
Interfaz	Rígido

Se utilizaron micropilotes para representar la estructura de contención en lo que se conoce como un sistema de micropilotes in situ. Cada elemento del sistema de contención se modeló principalmente como un modelo elástico lineal, considerando propiedades como el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el peso específico.

Tabla 2: Propiedades geométricas y mecánicas de los micropilotes.

Parámetros	Valor
E	$2 * 10^8 kPA$
Peso unitario drenado	$23 kN/m^3$
Diámetro	0,0381m
Longitud	0,89m
Inclinación	30°

6. Modelo numérico

El estudio se realizó con el software MIDAS GTS NX, que permite crear modelos de elementos finitos para representar aspectos mecánicos y geométricos del perfil del suelo y la estructura de contención. En el modelo de elementos finitos (MEF) se consideró la restricción de los desplazamientos horizontales y verticales por las condiciones de frontera establecidas en el experimento de laboratorio. En el modelo se consideraron únicamente las cargas correspondientes al peso propio de cada elemento (suelo y micropilotes). Este enfoque se basa en la suposición de que el modelo se encuentra en el límite de falla, por lo que es necesario determinar las fuerzas internas de los micropilotes y correlacionar estos resultados con la estabilidad del talud.

Para modelar las propiedades del suelo, se utilizaron enmallados 3D sólidos, apropiados para representar suelos en condiciones geométricas tridimensionales. Estos enmallados se aplicaron a dos estratos: el primer estrato representa el talud que se está analizando y el segundo estrato es la conformación del suelo a lo largo del tiempo, ambos estratos comparten características similares en cuanto a las propiedades del material. Además, se realizó un control de enmallado en el modelo para generar nodos representativos que proporcionaran la información necesaria. El tamaño del enmallado utilizado fue de 0.1 metros para los elementos del suelo, la roca y la zona del micropilote (Ver Figura. 4).

El modelo constitutivo para este caso es el de Suelo Endurecido para Pequeñas Deformaciones (HS-Small). Este modelo es capaz de simular de manera no lineal hiperbólica la relación esfuerzo-deformación y también incorpora el endurecimiento en trayectorias tanto isotrópicas como de corte, lo que facilita la predicción más realista de las deformaciones inducidas [19].

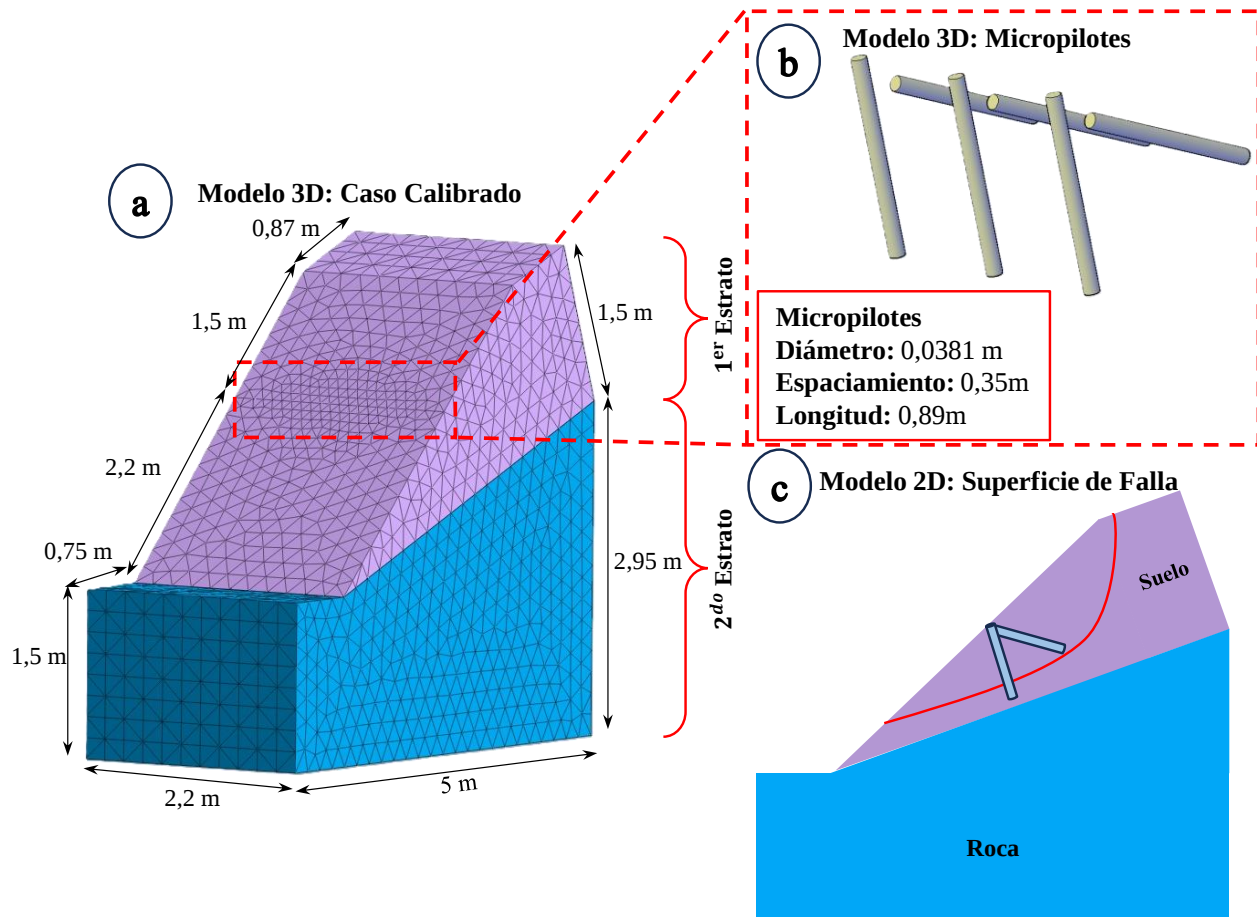
La Figura 4 muestra el talud modelado, que tiene una altura de 1.5 metros y una longitud de base de 4.25 metros, con una inclinación de 24 grados. Los micropilotes se encuentran en el centro, a una distancia de 1.5 metros desde la cresta del talud. Se utilizaron 6 micropilotes con un espaciamiento de 0.35 metros. Estos micropilotes tienen un diámetro de 0.0381 metros y fueron reforzados, perforados y cementados por gravedad. El módulo de elasticidad (E) es de $2 * 10^8 kPA$.

La modelación numérica incorporó el análisis de múltiples etapas constructivas (Ver tabla 3), abarcando las diversas fases requeridas para la implementación de un proyecto de estabilidad de taludes con micropilotes. En la primera etapa, se llevó a cabo la creación del modelo, estableciendo sus condiciones de frontera laterales y de nivel freático. En la segunda etapa, se activó la carga estática correspondiente al peso propio. En la tercera etapa, se evaluó la estabilidad del talud mediante el método (SMR), seguido de la eliminación de los desplazamientos que el talud pudo haber experimentado, preparándolo para la siguiente etapa. En la cuarta etapa, se activaron los micropilotes y la restricción del giro en Z de estos elementos. En la quinta etapa, se activaron las condiciones de frontera de la lluvia, con una duración de 1000 segundos, y simultáneamente se desactivó la condición del nivel freático inicial. Finalmente, en la sexta etapa, se calculó el factor de estabilidad mediante el método SMR tras completar las etapas cuarta y quinta.

Tabla 3: Guía de sistema constructivo utilizado para el análisis del caso de estudio.

Etapas	Nombre	Descripción de la etapa
1	Flujo Inicial.	Se activan todas las mallas que representan el modelo experimental y se activa las condiciones de frontera del nivel freático inicial (NAF-Inicial).
2	Esfuerzos Iniciales.	Se activan las condiciones de frontera en donde se restringe el movimiento en los ejes X, Y y Z del talud, también se activa la carga estática que es el peso propio.
3	Estabilidad Inicial.	En esta etapa se calculan la estabilidad del talud por medio del método SMR, adicional a lo anterior se despejan los desplazamientos que haya podido tener el talud, con el fin de prepararlo para la siguiente etapa.
4	Construcción de Pilotes.	Se activa la malla de los pilotes y se activa la condición de la restricción de giro en el eje Z para estos elementos.
5	Lluvia por 1000 Seg.	Se activan las condiciones de frontera de la capa de "Revisión" y "Lluvia", en donde fijamos una duración de 1000 segundos, adicionalmente se desactiva la condición de "NAF-Inicial".
6	Estabilidad con lluvia.	En esta etapa se calcula el factor de estabilidad del talud por medio del método SMR luego de haber pasado por las etapas de construcción y lluvia.

Figura 4: Modelo de Midas GTS NX para análisis.



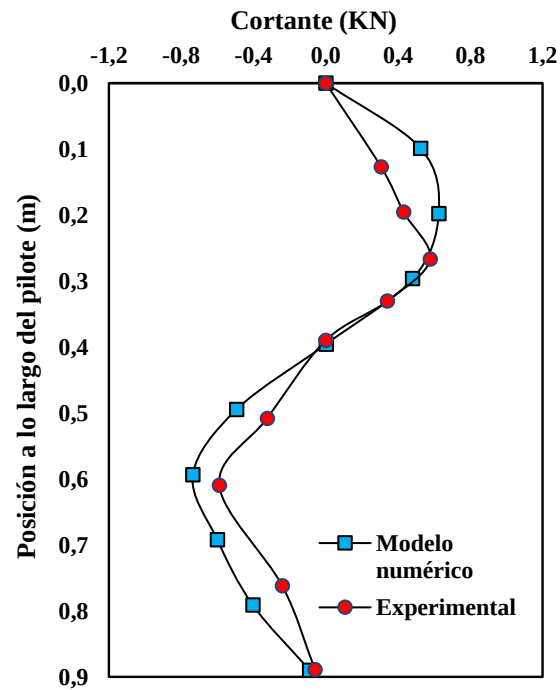
7. Calibración numérica

Para llevar a cabo el proceso de calibración del caso de estudio, se utilizaron los datos de fuerzas cortantes obtenidos del modelo experimental realizado por Bozok [16] en la Universidad de Missouri. En dicho modelo experimental, se colocaron extensores de cable, tensiómetros y calibradores de tensión en el talud. Estos datos se encuentran detallados en el trabajo de grado del ingeniero Andrew Z. Boeckmann [17].

Las fuerzas de cortante y momentos del modelo numérico se extrajeron específicamente del micropilote intermedio, el cual se definió como parte del sistema de estabilidad del talud en estudio. Los parámetros geotécnicos del modelo se establecieron con base en la caracterización geotécnica obtenida de los ensayos de laboratorio. La calibración del modelo se centró en garantizar que la curva de cortante de la modelo experimental realizada por Bozok se ajuste con el modelo numérico.

La Figura 5 evidencia esta concordancia, mostrando una correlación significativa que valida la precisión del modelo para simular el comportamiento del material.

Figura 5: Resultados del modelo numérico y los resultados experimentales con el diagrama de cortante.

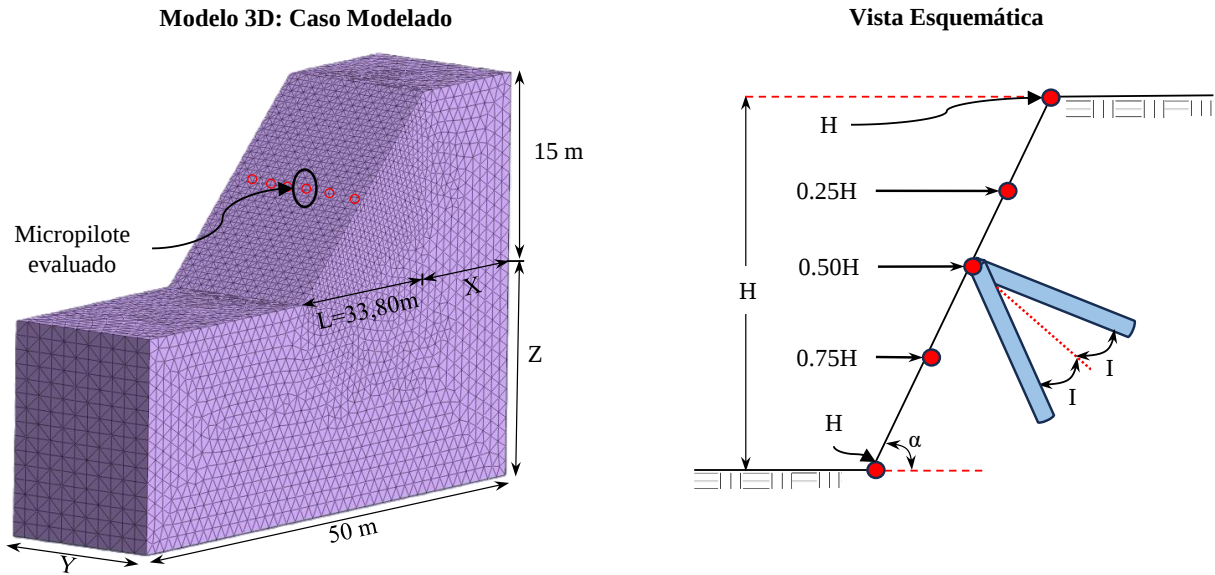


8. Casos de análisis

En este estudio, se evaluó la influencia de los parámetros geométricos en la estabilidad del sistema de taludes. Para esto, se hizo un análisis para entender cómo estos parámetros afectan principalmente al factor de seguridad (F.S) y a los diagramas de cortante y momento en el sistema de micropilotes, tomando como referencia el caso de estudio calibrado.

Para el estudio paramétrico, se empleó un modelo de elementos finitos previamente verificado. No obstante, se ajustaron las dimensiones del modelo para reflejar con mayor precisión las pendientes y pilotes reales. El talud modelado presentó una altura de 15 m y una longitud basal de 33,80 m, con una inclinación de 44°. Se posicionaron los micropilotes en distintas alturas relativas al talud (H , $0.25H$, $0.50H$ y $0.75H$), utilizando un total de seis micropilotes espaciados a 3,5 m entre sí. El suelo fue modelado como arena limosa. Se llevó a cabo un análisis de límites para estudiar el efecto de la ubicación de los límites en la superficie de falla (valores de X , Y y Z (ver Fig. 6)). El valor de X se cambió de 8,7 m a 25 m, Y se cambió de 22 m a 50 m y Z se cambió de 15 m a 30 m.

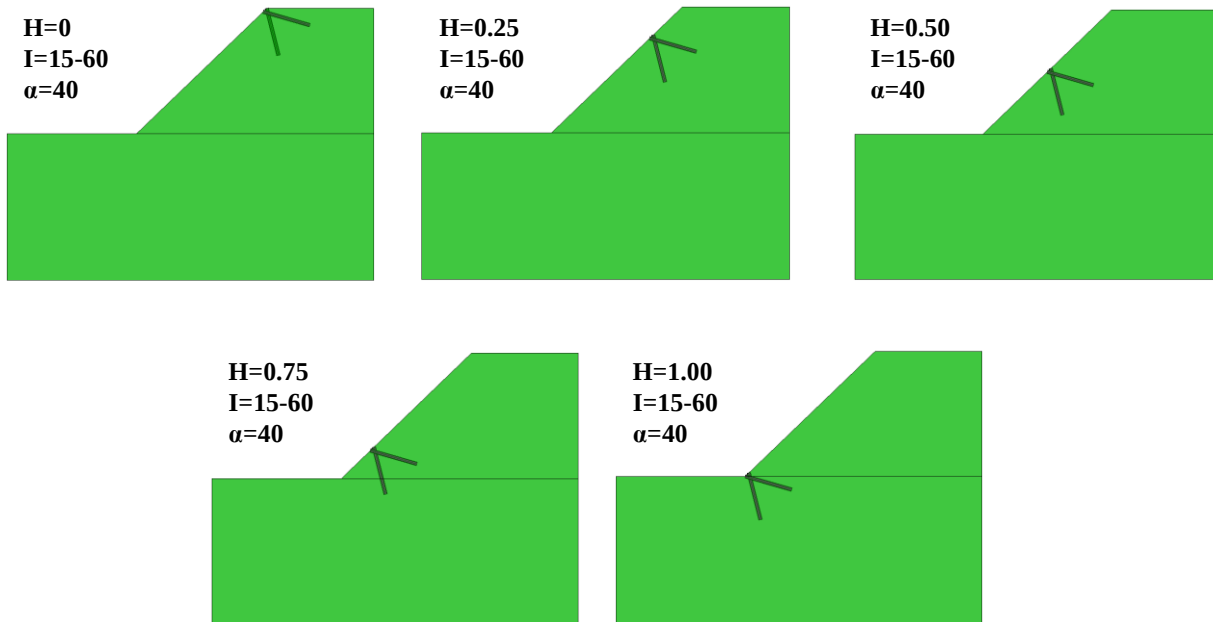
Figura 6: Modelo geométrico usado en los casos de análisis.



8.1 Variación en el posicionamiento, ángulo de inclinación y diámetro de micropilotes

Este trabajo analiza la influencia del ángulo de inclinación de los micropilotes en la mejora de la estabilidad de un talud mediante un modelo numérico tridimensional. Se consideran diferentes ángulos de inclinación, desde 15° hasta 60° , y se evalúa el cortante (kN), momento (kN-m) y el factor de seguridad del talud para cada caso.

Figura 7: Casos de estudio con variación de posicionamiento, ángulo de inclinación y diámetros.



Respecto a la inclinación de los micropilotes, se efectuarán modificaciones en el ángulo. Inicialmente, en el modelo calibrado, se estableció un ángulo de 30 grados. Para este análisis, se variará la posición con respecto a la horizontal en el talud (H), el ángulo de inclinación (I) con respecto a la perpendicular del talud y el diámetro de los micropilotes. Tomando como base el modelo calibrado, se han propuesto los siguientes escenarios:

Tabla 4: Casos de análisis variando la inclinación y la posición con respecto a la horizontal del conjunto de micropilotes con un diámetro de 0.381 m.

Caso	Posición de micropilotes (H)	(I)	Caso	Posición de micropilotes (H)	(I)	Caso	Posición de micropilotes (H)	(I)
C1	0	15	C14	0.75	25	C27	0.25	40
C2	0.25	15	C15	1	25	C28	0.5	40
C3	0.5	15	C16	0	30	C29	0.75	40
C4	0.75	15	C17	0.25	30	C30	1	40
C5	1	15	C18	0.5	30	C31	0.25	50
C6	0	20	C19	0.75	30	C32	0.5	50
C7	0.25	20	C20	1	30	C33	0.75	50
C8	0.5	20	C21	0	35	C34	1	50
C9	0.75	20	C22	0.25	35	C35	0.25	60
C10	1	20	C23	0.5	35	C36	0.5	60
C11	0	25	C24	0.75	35	C37	0.75	60
C12	0.25	25	C25	1	35	C38	1	60
C13	0.5	25	C26	0	40			

Tabla 5: Casos de análisis variando la longitud y la posición con respecto a la horizontal del conjunto de micropilotes con un diámetro de 0.75 m.

Caso	Posición de micropilotes (H)	(α)	Caso	Posición de micropilotes (H)	(α)	Caso	Posición de micropilotes (H)	(α)
C39	0	15	C52	0.75	25	C65	0.25	40
C40	0.25	15	C53	1	25	C66	0.5	40
C41	0.5	15	C54	0	30	C67	0.75	40
C42	0.75	15	C55	0.25	30	C68	1	40
C43	1	15	C56	0.5	30	C69	0.25	50
C44	0	20	C57	0.75	30	C70	0.5	50
C45	0.25	20	C58	1	30	C71	0.75	50
C46	0.5	20	C59	0	35	C72	1	50
C47	0.75	20	C60	0.25	35	C73	0.25	60
C48	1	20	C61	0.5	35	C74	0.5	60
C49	0	25	C62	0.75	35	C75	0.75	60
C50	0.25	25	C63	1	35	C76	1	60
C51	0.5	25	C64	0	40			

Las gráficas (a-h) de las figuras 9, 10, 11 y 12 muestran cómo varía el valor de cortante y momento del micropilote central en diferentes puntos a lo largo del talud para distintos ángulos de inclinación:

Figura 8: Esfuerzo cortante variando el ángulo de inclinación y la posición de los micropilotes a lo largo del talud modelado con un diámetro de 0.381 m.

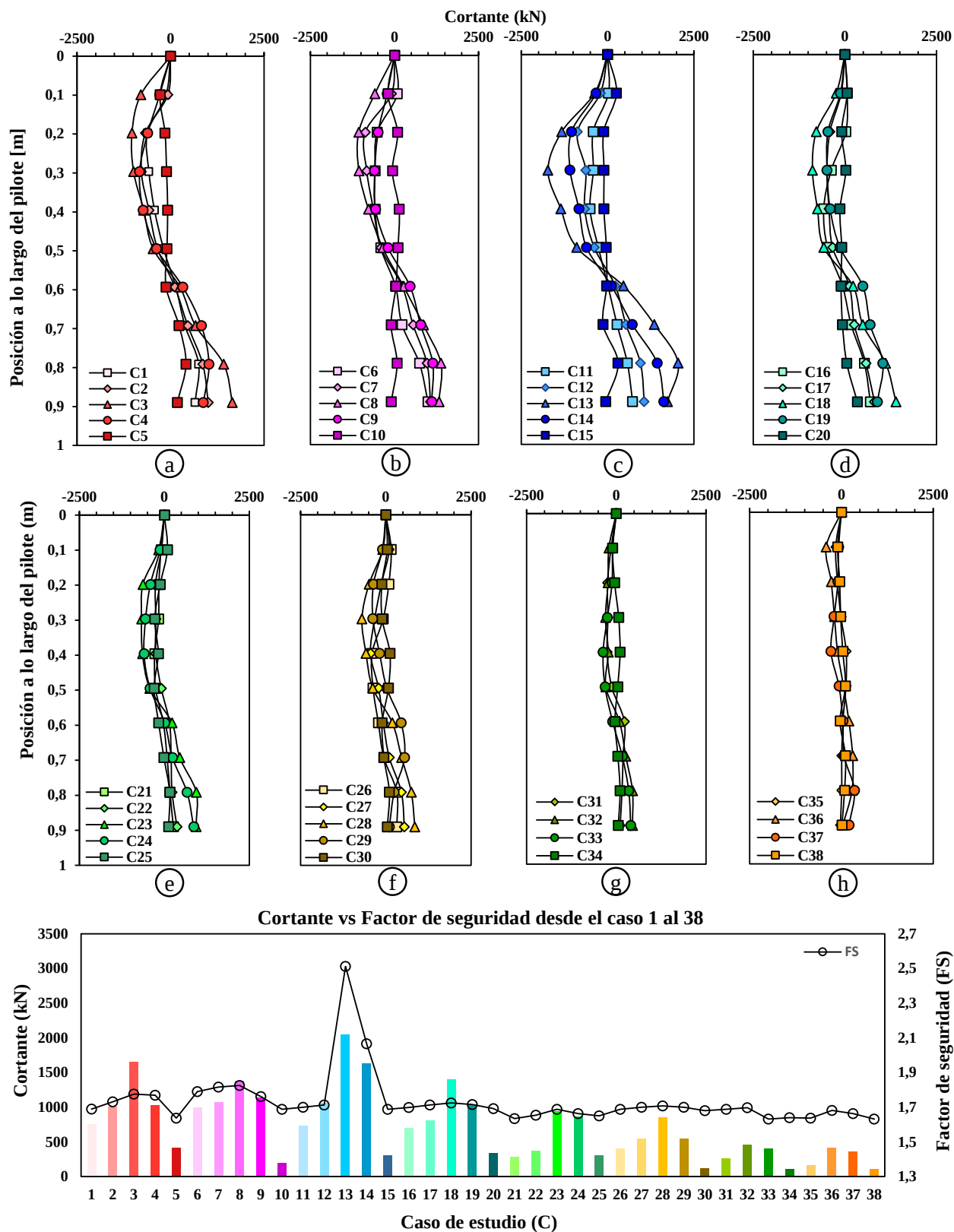


Figura 9: Esfuerzo cortante variando el ángulo de inclinación y la posición de los micropilotes a lo largo del talud modelado con un diámetro de 0.75 m.

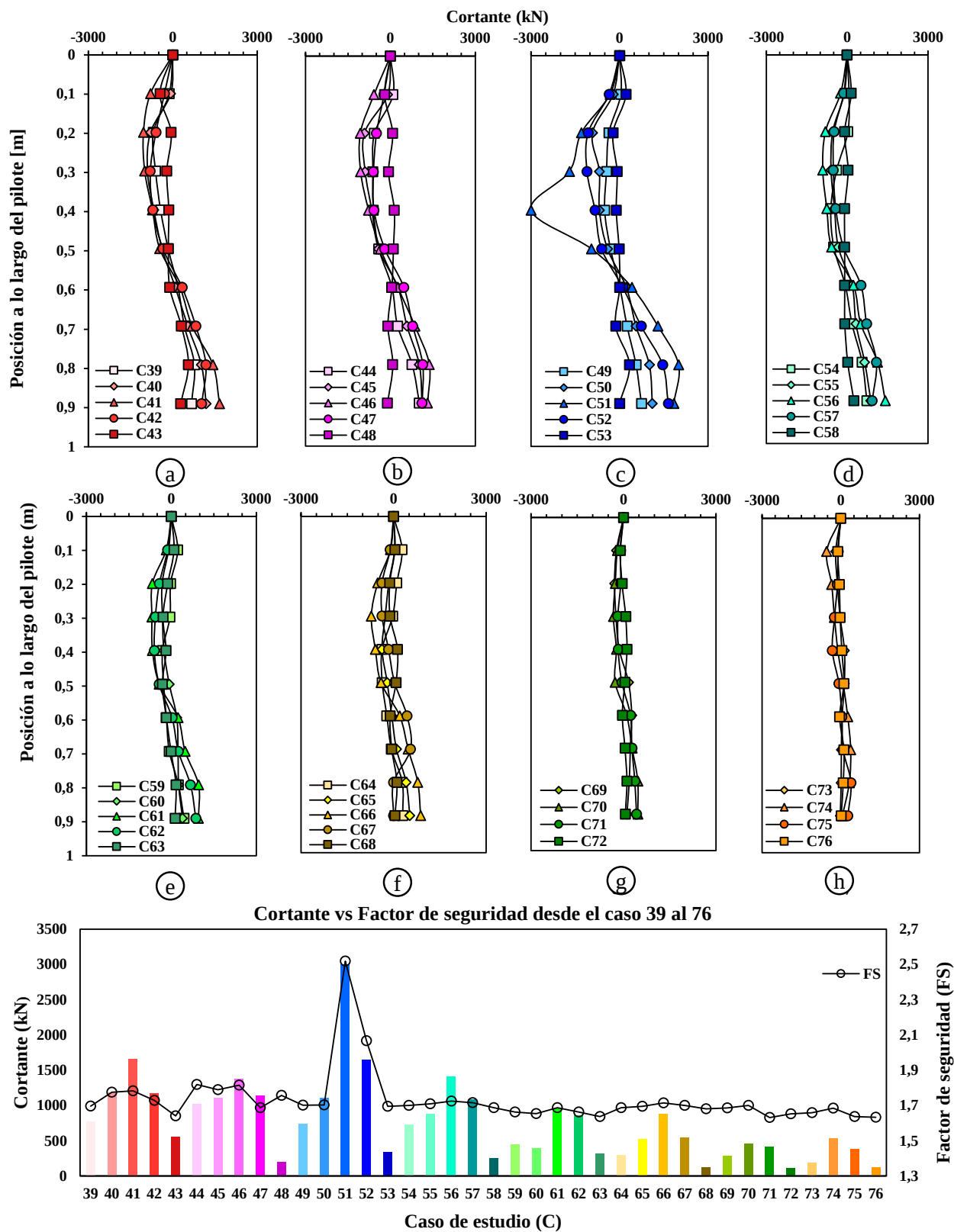


Figura 10: Momento variando el ángulo de inclinación y la posición de los micropilotes a lo largo del talud modelado con un diámetro de 0.381 m.

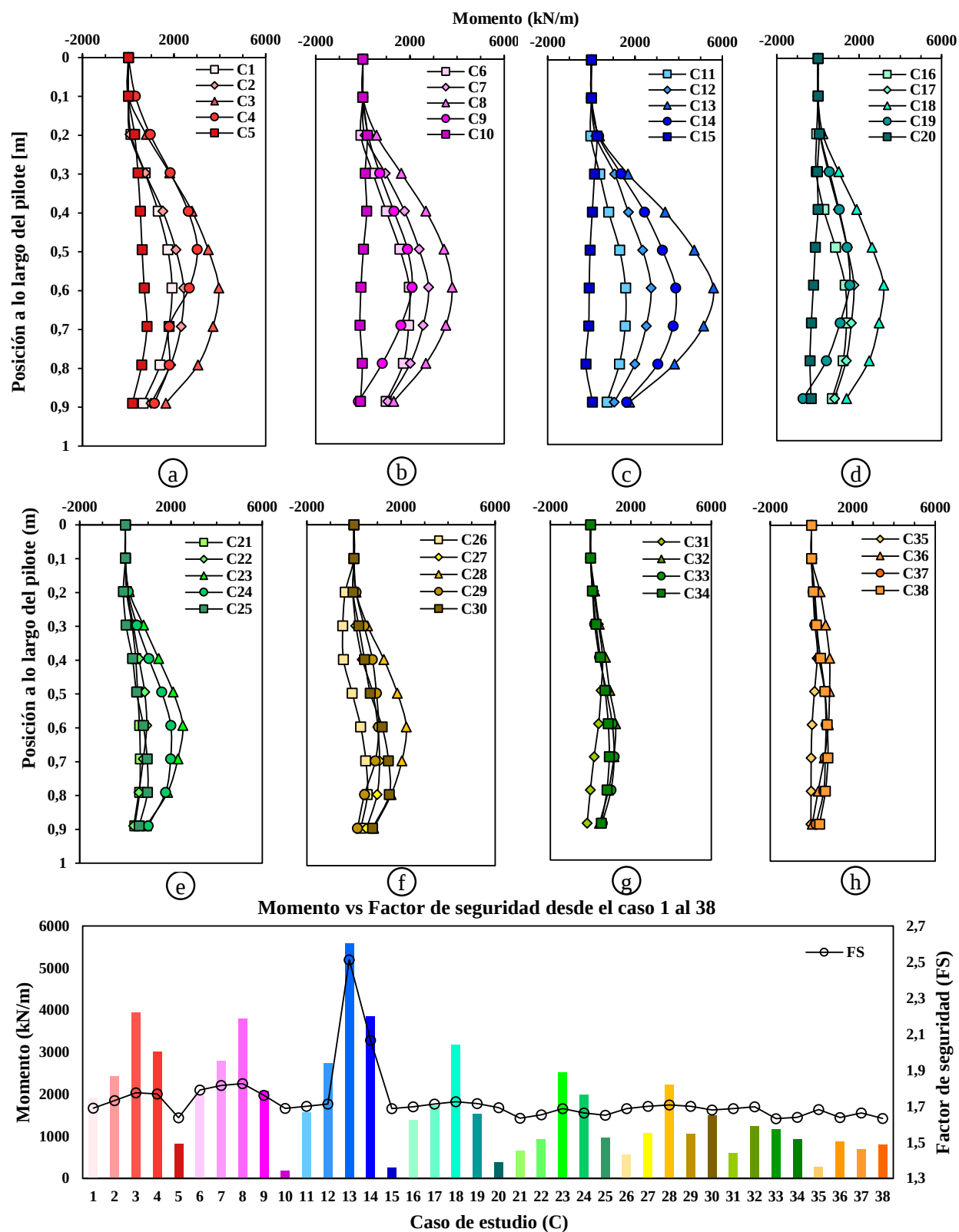
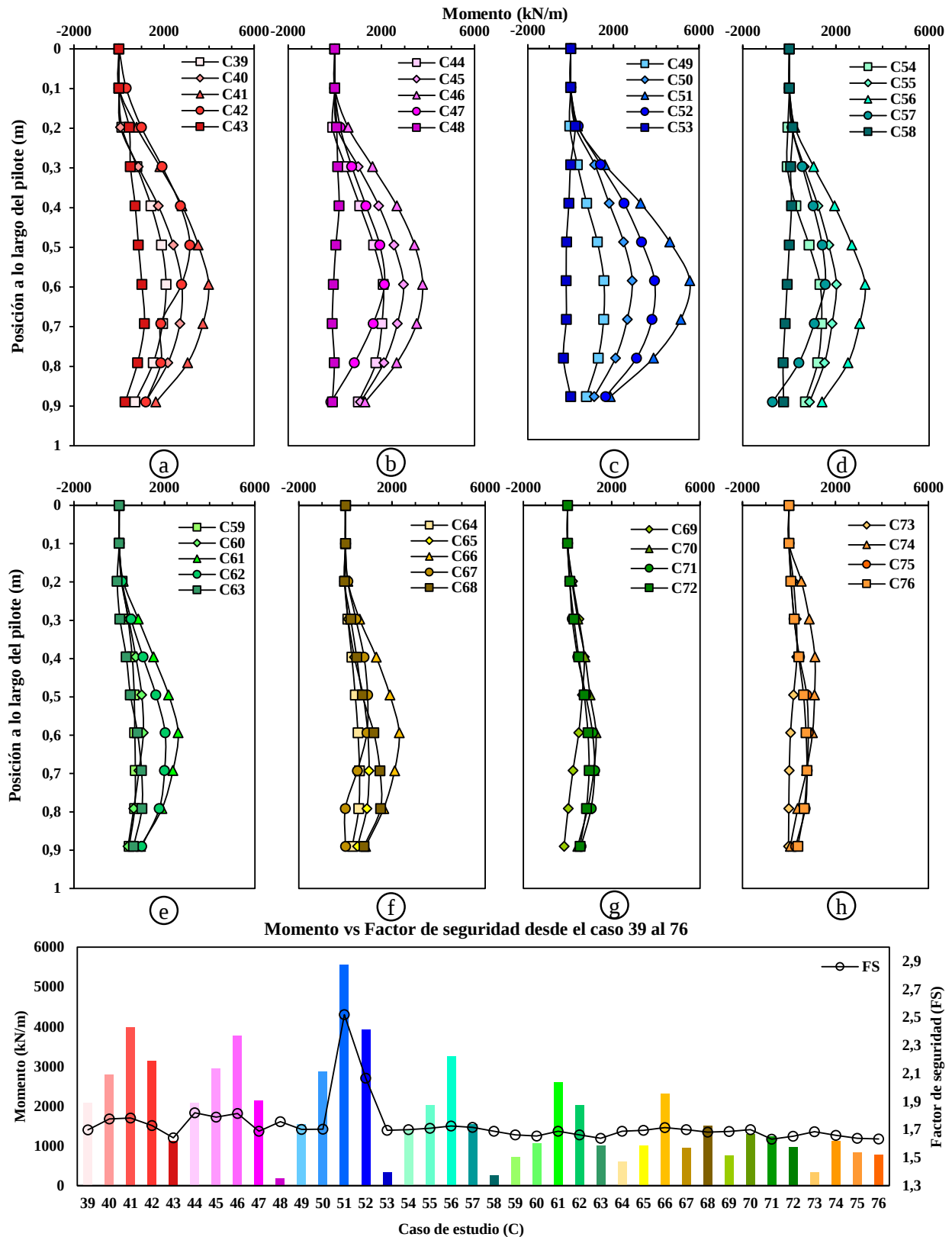


Figura 11: Momentos variando el ángulo de inclinación y la posición de los micropilotes a lo largo del talud modelado con un diámetro de 0.75 m.



8.1.1 Efectos en la variación de la posición del pilote

La selección de la ubicación de los micropilotes se realizó tomando en cuenta aspectos como la configuración geométrica y el perfil geotécnico específico de cada situación. Colocar los micropilotes demasiado cerca de la cima de una masa de suelo potencialmente inestable resultó en una contención insuficiente de la ladera inferior. Inversamente, situarlos muy próximos al pie de la pendiente alteró el mecanismo de inestabilidad, desviando el movimiento hacia una ruta superior a la línea de micropilotes.

La Figura 8 mostró los valores de esfuerzo cortante para micropilotes de 0.381m de diámetro, variando su posición a lo largo del talud. La ubicación de los micropilotes se ajustó en proporciones de 0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 con respecto a la altura total del talud (H), que fue de 15.0 m. La inclinación de los micropilotes (I) se estableció en un ángulo de 30° perpendicular a la superficie. Los gráficos de la (a) a la (f), que correspondieron a los casos del 1 al 30, demostraron un patrón uniforme. Todos indicaron que el esfuerzo cortante fue mayor cuando la posición fue de 0.5H, seguido por incrementos significativos en $H = 0.75$ y $H = 0.25$.

En la Figura 8a, para una inclinación de 15°, se observó una variación en el esfuerzo cortante entre los casos 2 y 3 del 39.20%, entre los casos 3 y 4 del 37.9%, y una diferencia de 2.09% entre los casos 2 y 4. En la Figura 8b, con una inclinación de 20°, la variación fue del 22.71% entre los casos 7 y 8, del 17.61% entre los casos 8 y 9, y del 6.19% entre los casos 7 y 9. Por último, la Figura 8c, que representó una inclinación de 25°, mostró variaciones en el esfuerzo cortante del 48.17% entre los casos 12 y 13, del 20.09% entre los casos 13 y 14, y del 35.14% entre los casos 12 y 14.

Este comportamiento se mantuvo constante, sin embargo, no se registró un incremento en el esfuerzo cortante ni en el factor de seguridad más allá de una inclinación de 25°. Esto se atribuyó a que, aunque los valores más altos se presentaron con una posición de 0.5H, no superaron los obtenidos con una inclinación de 25°. Entre las Figuras 8b y 8c, se destacó un aumento en el esfuerzo cortante del 48%, el cual representó el valor más alto en todos los casos estudiados. El análisis sugirió una disminución de la resistencia interna, ya que las figuras de la 8d a la 8h mostraron una reducción en los valores de esfuerzo cortante, con variaciones que fueron del 9% al 47%.

8.1.2 Efectos en la variación de la inclinación del micropilote

La inclinación de los micropilotes constituye un aspecto crítico en el diseño y la construcción de taludes, dado que afecta directamente la transferencia de cargas, la capacidad de resistir flexiones, la prevención de deslizamientos y la distribución de tensiones en el terreno. Este estudio se enfoca en evaluar el impacto que tiene la inclinación de los micropilotes en la eficacia de la transferencia de cargas. Para este fin, se ha implementado un modelo numérico en tres dimensiones, el cual facilita una simulación más exacta y detallada de las condiciones del suelo en la realidad.

Se analizaron diferentes ángulos de inclinación de los micropilotes, desde 15° hasta 60°, y se evaluaron variables claves como el cortante (kN), el momento (kN/m) y el factor de seguridad (FS) del talud para cada caso. Los ángulos de inclinación de los micropilotes (I) se ajustaron respecto a la vertical del talud, variando entre 15° y 60° (Ver tabla 4 y 5).

La Figura 8 ilustra las gráficas (a) a (d), las cuales representan los casos del 1 al 20. Se observa que las inclinaciones de los micropilotes entre 15° y 30° generan los esfuerzos cortantes más significativos. El análisis revela que el valor máximo de esfuerzo cortante ocurre a una inclinación de 25° .

Las comparaciones entre las Figuras 8a y 8b mostraron una diferencia significativa del 16%. Entre las Figuras 8b y 8c, se registra un notable incremento del 48%, mientras que entre las Figuras 8c y 8d, se presentó una variación del 32%. Estos datos indican que existe una tendencia consistente: conforme se incrementa la inclinación de los micropilotes, se produce una reducción tanto en los esfuerzos cortantes como en el factor de seguridad. Comparando las figuras 8c y 8e, correspondiente a una inclinación de 25° y 40° respectivamente, se registró una diferencia en los esfuerzos cortantes del 54%. Por otro lado, las figuras 8e y 8f, que representa una inclinación de 50° muestra disminución de esfuerzos cortantes de 9%. Finalmente, el caso más crítico se presenta en la figura 8h, con 60° de inclinación, donde el esfuerzo cortante presentó una diferencia del 80% respecto a los datos registrados en la figura 8c. La disminución entre las figuras 8g y 8h es del 15%, señalando este último como el caso de mayor riesgo en nuestro estudio. A partir de estos hallazgos, se concluye que existe una relación inversamente proporcional entre la inclinación de los micropilotes y la magnitud de los esfuerzos cortantes y el factor de seguridad.

En la figura 10 las gráficas desde la (c) hasta la (h) se observó un decrecimiento en el momento flector a medida que la inclinación de los micropilotes supera los 25° de inclinación. En las figuras 10b y 10c se analiza en los casos 8 y 13 un incremento del 47.51%, sin embargo, la comparación entre las figuras 10c y 10d los casos 13 y 18 evidencia una reducción del 43.01%. Este comportamiento se repite para todos los casos subsiguientes donde la disminución de momentos flectores oscila entre 11.59% hasta 47.41%.

8.1.3 Efectos en la variación del diámetro del micropilote

El diámetro de los micropilotes ejerce un impacto considerable en la rigidez y en la resistencia al corte del suelo circundante al sistema de retención. El diámetro de los micropilotes se establece con base a las características particulares del caso de estudio, considerando las características del perfil del suelo, la profundidad de la superficie de falla y el nivel de deformaciones permitido. Teniendo presente lo anterior, este estudio consideró micropilotes con diámetros (D) de 0.381 m y 0.75 m para evaluar la influencia de este factor en el comportamiento del sistema de retención.

En la figura 9, la cual representa los valores de cortante con diámetro de 0.75m se puede analizar un aumento a comparación de los datos interpretados en la figura 8. Sin embargo, el factor seguridad no presenta variaciones significativas con el aumento de diámetro.

Las figuras 8a y 9a, presentan incrementos que oscilan entre 2% y 35%; las figuras 8b y 9b evidencia un aumento entre 3% y 5%; las figuras 8c y 9c establece incrementos del 2% al 11%. Este comportamiento se repite para todos los casos donde el aumento fluctúa en un rango entre 2% hasta 57%.

Por otro lado, analizando los valores de factor seguridad representados en las figuras 8 y 9, la diferencia entre estos no varía más allá del 4%. Esto se puede evidenciar en la figura 8-caso 9 y figura 9-caso 47, el incremento del FS es de 4%. No obstante, este comportamiento solo se manifiesta en el 5% de los casos. En su mayoría, el 64% de los casos registran incrementos de FS no mayores a 0.44%.

A partir de estos datos, se puede concluir que, aunque se observa un incremento en los esfuerzos cortantes y momentos flectores, este aumento no se considera significativo, ya que la variación del FS no supera el 4% para los casos estudiados.

8.2 Variación en la longitud del conjunto de micropilotes

En el estudio realizado, se analizó la influencia de la variación en la longitud de los micropilotes en la estabilidad de los taludes. Los parámetros utilizados incluyeron un ángulo de inclinación (I) de 30° y un diámetro (D) de 0.381 m. Además, se consideraron dos variables clave: la relación entre la longitud del micropilote (ℓ) y la altura total del talud (H). La longitud de los micropilotes se evaluó en cinco valores: 6.9 m, 7.9 m, 8.9 m, 9.9 m y 10.9 m. El objetivo era determinar la longitud óptima que proporcionara la máxima resistencia al corte y minimizara las deformaciones del terreno:

Figura 12: Casos de estudio variando la longitud de micropilotes.

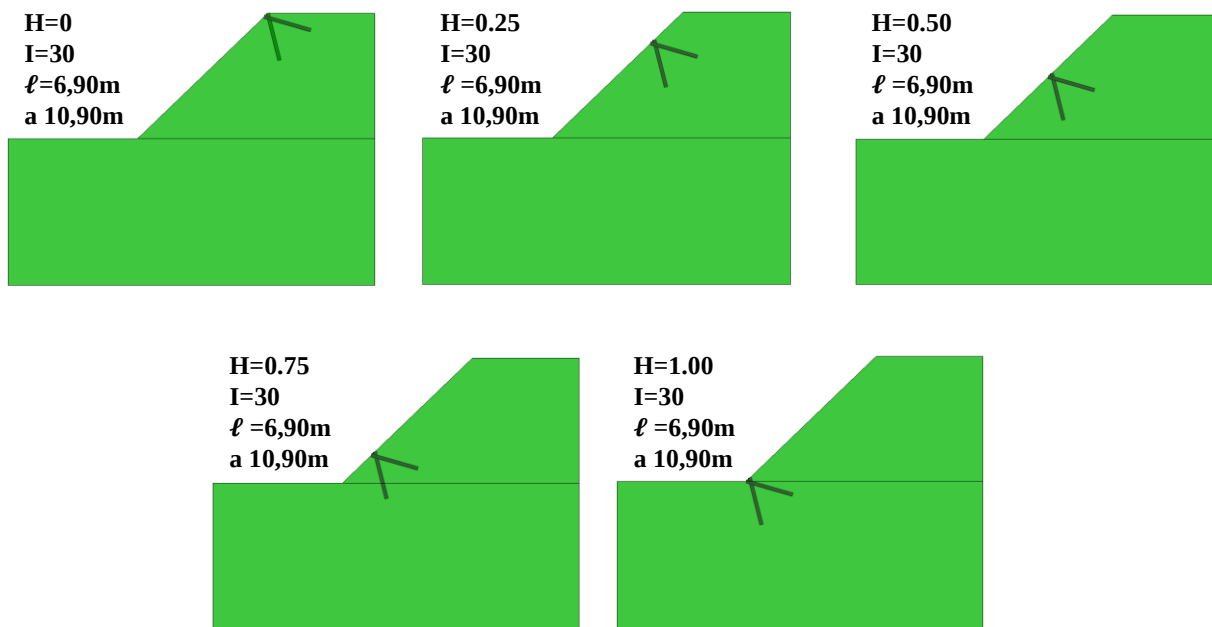


Tabla 6: Casos de análisis variando la longitud y la posición con respecto a la horizontal del conjunto de micropilotes con un diámetro de 0.381 m.

Caso	Posición de micropilotes (H)	(ℓ)	Caso	Posición de micropilotes (H)	(ℓ)	Caso	Posición de micropilotes (H)	(ℓ)
C77	0	6.9	C86	1	7.9	C94	0.5	9.9
C78	0.25	6.9	C87	0	8.9	C95	0.75	9.9
C79	0.5	6.9	C88	0.25	8.9	C96	1	9.9
C80	0.75	6.9	C89	0.5	8.9	C97	0	10.9
C81	1	6.9	C90	0.75	8.9	C98	0.25	10.9
C82	0	7.9	C91	1	8.9	C99	0.5	10.9
C83	0.25	7.9	C92	0	9.9	C100	0.75	10.9
C84	0.5	7.9	C93	0.25	9.9	C101	1	10.9
C85	0.75	7.9						

Figura 13: Cortante variando la longitud y la posición de los micropilotes a lo largo del talud modelado con un diámetro de 0.381 m.

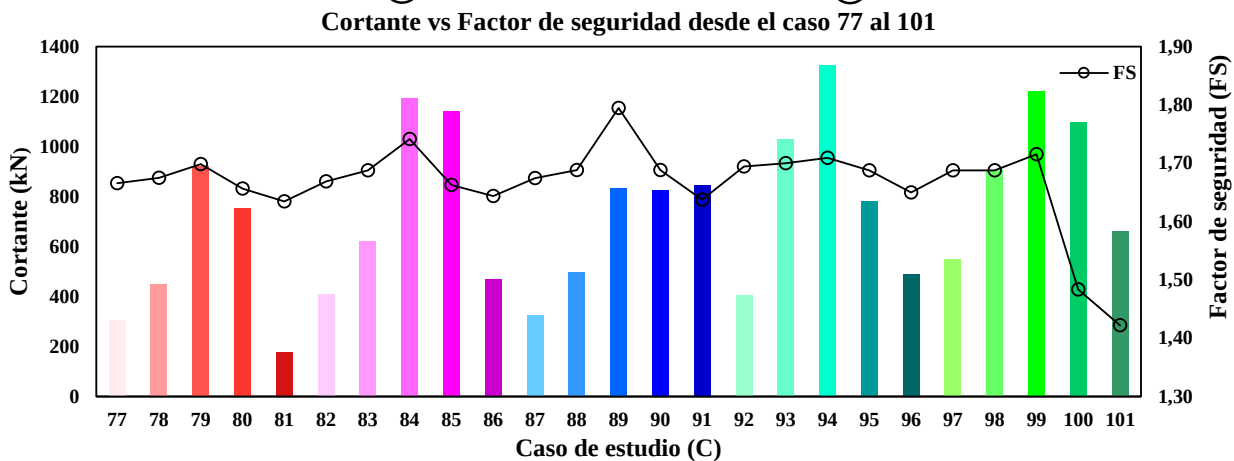
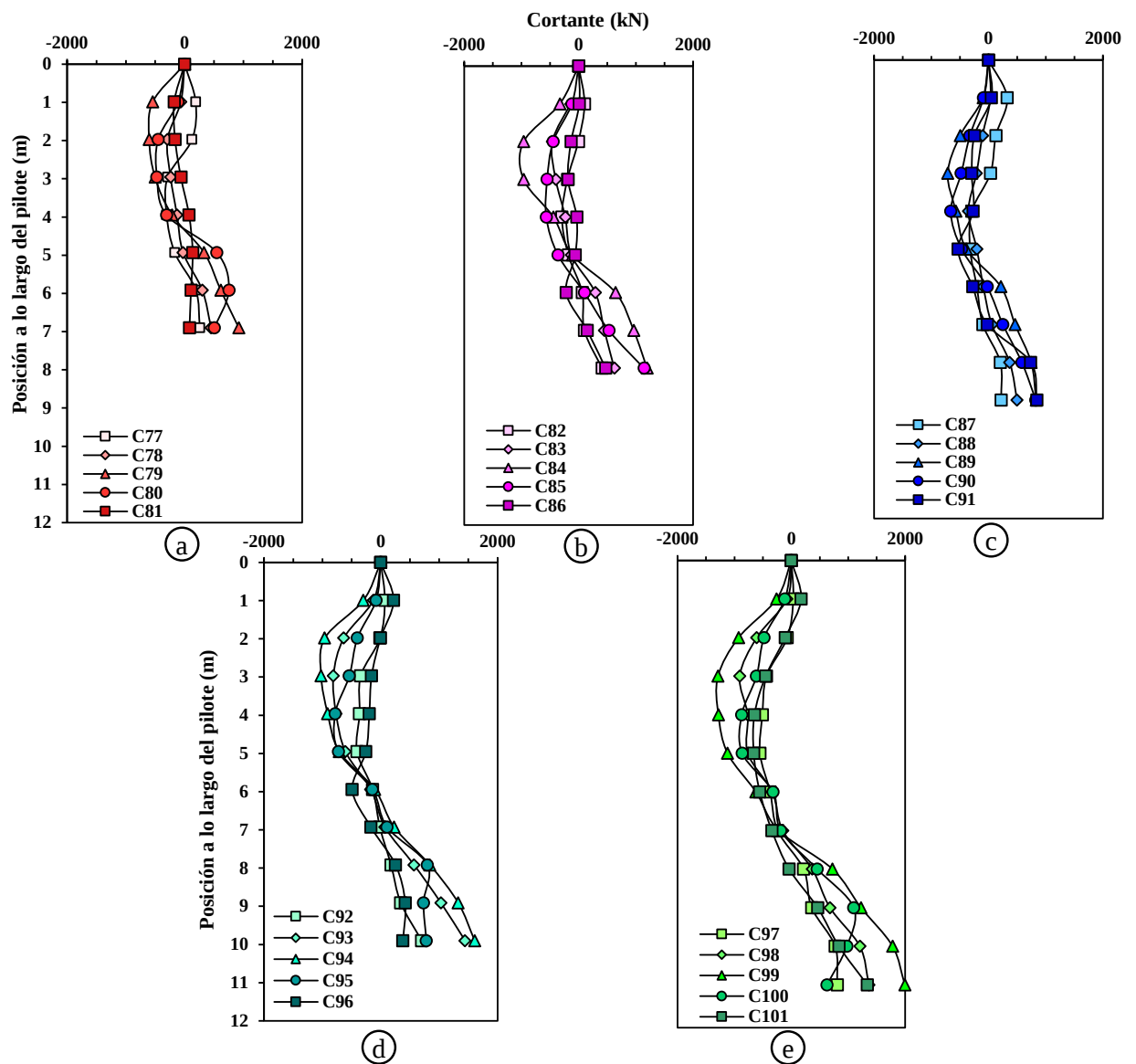
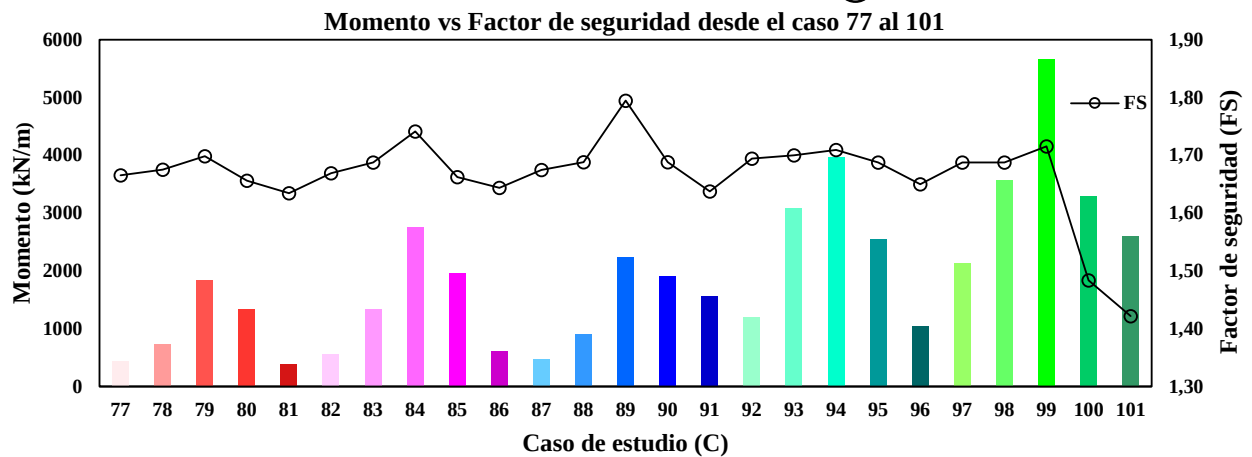
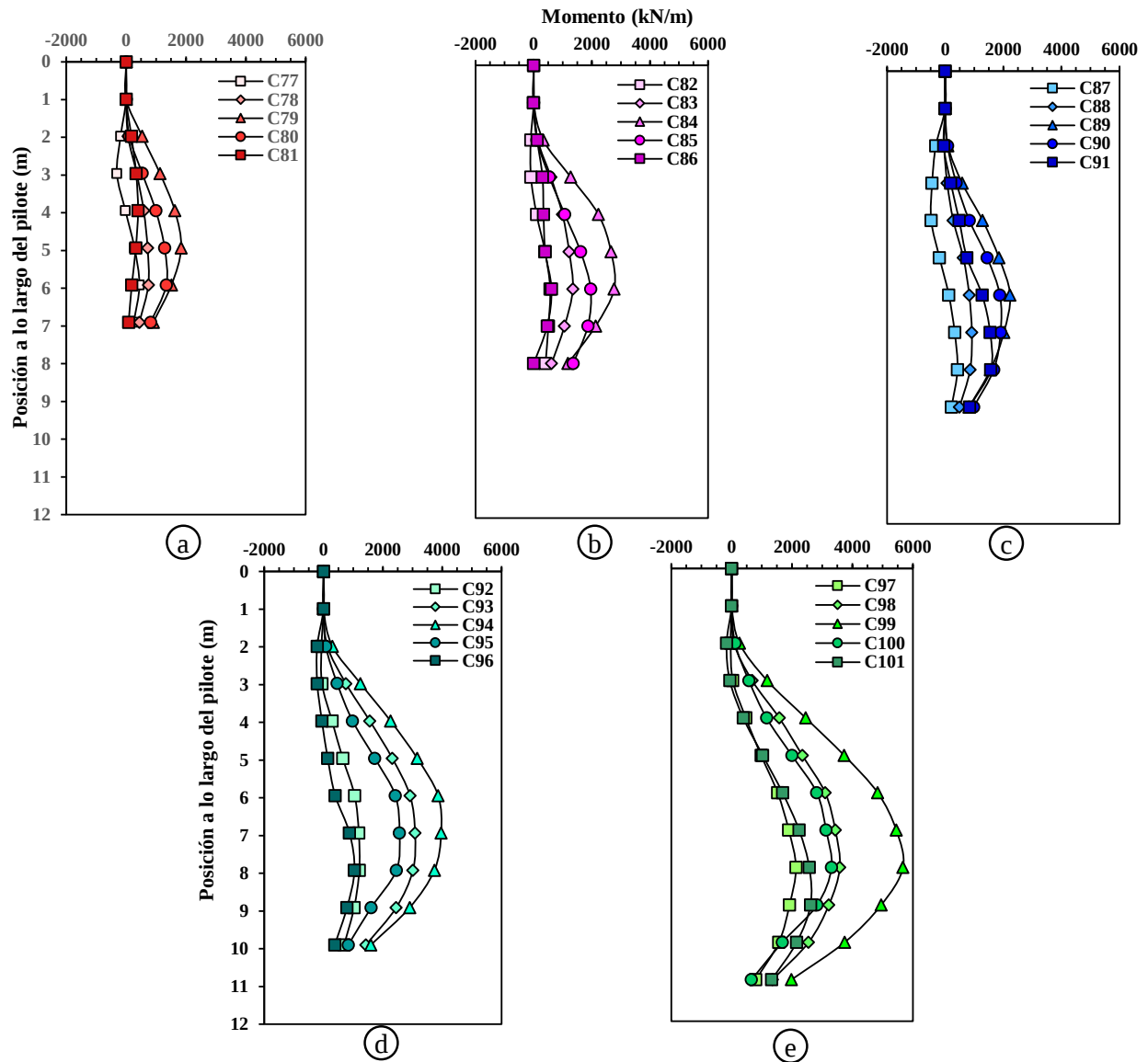


Figura 14: Momento variando la longitud y la posición de los micropilotes a lo largo del talud modelado con un diámetro de 0.381 m.



8.2.1 Efectos en la variación de la longitud del micropilote

La longitud adecuada de los micropilotes es esencial para garantizar la estabilidad de los taludes. Estos elementos actúan como refuerzos estructurales, proporcionando resistencia al corte y mitigando las deformaciones del suelo. Para que sean efectivos, los micropilotes deben alcanzar una profundidad que les permita empotrarse más allá de la superficie de deslizamiento, asegurándose de que se apoyen en una capa geológica capaz de soportar las cargas aplicadas. La determinación de esta longitud óptima debe ser cuidadosamente calculada, considerando la geología única de cada ubicación y las cargas específicas que el talud enfrentará, lo que convierte a cada proyecto en un desafío singular.

En la figura 13, se presentan los esfuerzos cortantes del micropilote central para los casos numerados del 77 al 101, todos con un diámetro de 0.381 m. A partir de los análisis previos, se observa una correlación en la que los mayores esfuerzos cortantes y momentos flectores se presentan cuando la posición (H) es igual a 0.5. Al analizar las figuras 13a hasta la 13e, se observa un comportamiento similar al registrado en la figura 8. A medida que la posición de los micropilotes varía (0.5, 0.75 y 0.25), se produce una disminución en los esfuerzos cortantes. Por ejemplo, al comparar los casos 79 y 80 de la figura 13a, se evidencia un decrecimiento del 18.27%, mientras que los casos 80 y 78 difieren en un 40.12%. Este comportamiento se refleja en todos los casos, donde las variaciones de los esfuerzos cortantes oscilan entre 4.41% y 45.42%.

Considerando el efecto de la variación de la longitud, las figuras 13 y 14 muestran variaciones significativas conforme aumenta la longitud de los micropilotes. No obstante, los resultados indican que, al superar los 9.9 m de longitud, tanto los esfuerzos cortantes como los momentos flectores tienden a disminuir. En las figuras 13a a la 13d, los casos 79, 84, 89 y 94 mostraron un incremento en las variaciones, oscilando entre el 29.66% y el 58.97%. Por otro lado, las figuras 14a a la 14d, al comparar los mismos casos, exhiben un comportamiento creciente, con variaciones que van del 50.51% al 77.50%.

El efecto en el factor de seguridad en la mayoría de los casos no es significativo. Sin embargo, se observaron las mayores variaciones cuando la relación (H) es igual a 0.5. Al analizar la figura 13, se encontró que, para los casos del 77 al 86, el factor de seguridad (F_s) oscila entre 0.192% y 2.538%. No obstante, los mayores cambios en el F_s se presentaron en los casos 79, 84, 89, 94 y 99, con variaciones que fluctuaron entre 2.538% y 4.75%.

Basándonos en la figura 13c, que muestra un micropilote con una longitud de 8.9 m, empleado en análisis paramétricos anteriores, se confirma que el esfuerzo cortante aumenta progresivamente a medida que la longitud del micropilote se incrementa. No obstante, este aumento se sostiene solo hasta alcanzar los 9.9 m de longitud. Más allá de este punto, el incremento en la longitud del micropilote comienza a disminuir para este caso específico.

9. Comparación con la literatura

Los resultados de las secciones previas se contrastaron con los hallazgos de los estudios realizados por A. Abdelaziz [11] y Jeong et al. [20], que exploraron el impacto de pilotes empotrados en la estabilidad de taludes. A pesar de las diferencias metodológicas, es posible comparar las tendencias observadas en ambos trabajos. Para sus análisis, los investigadores emplearon los programas PLAXIS y FLAC 2D, reconocidos en el ámbito de la ingeniería geotécnica por sus capacidades en el análisis de elementos finitos (FE el modelo de A. Abdelaziz [18] representó un talud de 12.5 m de altura y 40° de inclinación. El suelo se caracterizó con un peso unitario de 18 kN/m³, un ángulo de fricción interna de 33° y una cohesión de 3.4 kPa. Se seleccionaron un módulo de Young de 34 MPa y un coeficiente de Poisson de 0.25. El modelo constitutivo para los análisis FE fue igualmente un modelo elástico lineal con un módulo de Young de 2×10^8 kpa. Los micropilotes presentaron diámetros de 500 mm y 250 mm, con inclinaciones que variaron de 0° a 90° respecto a la horizontal y longitudes de 2 a 14 m.

Tabla 7: Datos de la comparación con la literatura.

Variable	Unidades	A. Abdelaziz	Jeong et al.
Software	N/A	PLAXIS	FLAC 2D
Altura del talud	m	12.5	10
Inclinación del talud	°	40	33.7
Parámetros del suelo			
Modelo constitutivo suelo	N/A	Elasto/Plástico con criterio de falla Mohr-Coulomb.	Elasto/Plástico con criterio de falla Mohr-Coulomb.
Peso unitario	kN/m ³	18	20
Ángulo de fricción	°	33	20
Cohesión	kPa	3.4	10
Módulo de Young	Mpa	34	200
Coeficiente de Poison	N/A	0.25	0.25
Parámetros de micropilotes			
Modelo constitutivo micropilotes	N/A	Elástico Lineal	Elástico Lineal
E	kPa	2×10^8	2×10^8
Diámetro de micropilotes	mm	500 y 250	25.4

Fuente: Datos extraídos de A. Abdelaziz [11] y Jeong et al. [20].

Se observó que el Factor de Seguridad (F.S.) incrementa conforme la relación de altura (H) va de 0 a 0.5, y posteriormente decrece para valores de H superiores a 0.5. Las figuras 8 a 14 ilustran un comportamiento de los micropilotes en el suelo que concuerda con los hallazgos de A. Abdelaziz [11] y Jeong et al. [20] indicando que la posición más efectiva de los micropilotes se encuentra aproximadamente a la mitad de la altura del talud. Esta observación es coherente con los resultados de estudios previos como los de Won et al. [15] Wei y Cheng [13] y Li et al. [21], que también identificaron esta ubicación como óptima.

10. Conclusiones

La investigación realizada detalla un análisis tridimensional (3D) de taludes reforzados con micropilotes, empleando el método de elementos finitos con el programa MIDAS GTS NX. Se formuló y validó un modelo de elementos finitos basándose en datos de laboratorio. Dicho modelo tridimensional se aplicó para examinar la influencia de diversos parámetros en el factor de seguridad (F.S.) de los taludes. Estos parámetros comprenden la distancia del micropilote desde la cima de la pendiente (H), la desviación del micropilote respecto a la vertical (I), la longitud (L) y el diámetro del micropilote (D). Los resultados obtenidos se compararon con los hallazgos reportados en la literatura científica. A partir de los casos analizados del talud de arena limosa, se pueden derivar las siguientes conclusiones:

1. Los resultados presentan una tendencia en cuenta al incremento del factor seguridad, esfuerzos cortantes y momentos flectores cuando la ubicación de los pilotes oscila entre $0.5H$ y $0.75H$. La posición óptima de los micropilotes se determinó a $0.5H$ de la altura total del talud, debido a que presentaron mayor eficiencia del esfuerzo cortante, proporcionando la contención más efectiva contra el deslizamiento del suelo. Las ubicaciones adicionales evaluadas, cuando estaban demasiado cerca de la cima o al pie de la pendiente, resultaron en un rendimiento deficiente del sistema de contención. Esto se reflejó en valores más bajos de cortante y momento en comparación con los observados a $0.5H$.
2. Se encontró que las inclinaciones entre 15° y 30° generan los esfuerzos cortantes más significativos, con un pico de eficacia a 25° . A medida que la inclinación aumenta más allá de 25° , tanto los esfuerzos cortantes como el factor de seguridad disminuyen, siendo más crítico a 60° con una reducción del 80% en el esfuerzo cortante. Además, se observó una disminución en el momento flector cuando la inclinación supera los 25° , lo que sugiere una relación inversamente proporcional entre la inclinación de los micropilotes y la estabilidad del talud.
3. Los estudios realizados con los dos diámetros analizados evidenciaron un aumento en los esfuerzos cortantes con el diámetro de 0.75 m, sin embargo, el factor de seguridad (FS) no mostró variaciones significativas. Los incrementos registrados de esfuerzos cortantes entre el diámetro de 0.381 m y 0.75 m indicaron incrementos que oscilan entre 2% y 35%. No obstante, estas variaciones en la mayoría de los casos registraron incrementos de FS no mayores al 0.44%. Por lo tanto, se recomienda una evaluación cuidadosa de la modificación de la geometría del sistema de retención, considerando la relación costo-eficiencia para prevenir gastos excesivos sin comprometer la integridad estructural del sistema.
4. La investigación determinó que la profundidad óptima de los micropilotes para maximizar los esfuerzos cortantes y los momentos flectores es de 8.9 m. Se observó que al extender la longitud más allá de 9.9 m, tanto los esfuerzos cortantes como los momentos flectores tienden a disminuir. El factor de seguridad (Fs) se mantiene relativamente estable, experimentando las variaciones más notables en con una longitud de 8.9 m. Por lo tanto, extender la longitud de los micropilotes mejora el esfuerzo cortante hasta cierto límite; superado este, no se observan beneficios significativos en términos de estabilidad.

11. Bibliografía

- [1] K. A. CÓRDOBA PEREIRA y N. GARCÍA MORALES, «ELABORACIÓN DE FICHA TÉCNICA DE MICROPILOTES COMO HERRAMIENTA,» UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, BOGOTÁ, D.C., 2022.
- [2] D. B. a. I. Juran, «Drilled and Grouted Micropiles: State-of-Practice Review. US Federal Highway Administration,» Publication FHWA-RD-96-017, Washington DC, 1997.
- [3] J.-c. W. a. X.-l. B. S.-w. Sun, «Design of micropiles to increase earth slopes stability,» Journal of Central South University, vol. 20, pp. 1361-1367, Changsha, Hunan, 2013.
- [4] K. M. Y. T. Y. O. a. G.-L. Y. Y. Tsukada, «Mechanism of bearing capacity of spread footings reinforced with micropiles,» Soils and foundations, vol. 46, pp. 367-376, 2006.
- [5] Instituto Nacional de Vías, «Manual de estabilidad de taludes,» INVIAS, Bogotá D.C, 1998.
- [6] A. Campos G., N. Holm-Nielsen, C. Diaz G., D. M. Rubiano V., C. R. Costas P., F. Ramirez C. y E. Dickson, «Resumen Ejecutivo Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas,» BANCO MUNDIAL COLOMBIA, Bogotá, 2012.
- [7] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, Bogotá D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.
- [8] A. d. P. B. Rojas, P. d. I. F. Martín y C. O. Mazo, «Los pilotes y micropilotes como solución para estabilizar taludes,» 2007. [En línea]. Available: <http://oa.upm.es/36760>. [Último acceso: 4 2 2024].
- [9] S.-W. Sun, W. Wang y F. Zhao, «Three-Dimensional Stability Analysis of a Homogeneous Slope Reinforced with Micropiles,» *Hindawi Publishing Corporation*, 2014.
- [10] Xueling Liu, Jinkai Yan, Bin Tong y Lei Liu, «Evaluation of Micropiles With Different Configuration Settings for Landslide Stabilization Based on Large-Scale Experimental Testing,» *Frontiers in Earth Science*, 2021.
- [11] A. Abdelaziz, D. Hafez y A. Hussein, «The effect of pile parameters on the factor of safety of piled-slopes using 3D numerical analysis,» *HBRC Journal*, 2015.
- [12] R. D. Salvatierra Torres, «ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE PARA PREVENIR DESLIZAMIENTOS DURANTE LA EXPANSIÓN DE UN DEPÓSITO DE MINERALES EN MINAS A CIELO ABIERTO, LA LIBERTAD 2021,» UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, TRUJILLO, 2021.
- [13] W. Wei y Y. Cheng, «Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles,» *Computers and Geotechnics, Geotechnics*, vol. 36, no. 7, pp. 1176-1185, 2009.

- [14] A. D. P. BOTELLO ROJAS, «SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE MICROPILOTES TRABAJANDO A FLEXIÓN Y/O CORTANTE EN ESTRUCTURA DE TIERRA,» UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, MADRID, 2015.
- [15] J. Won, K. You, S. Jeong y S. Kim, «Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems,» *Computers and Geotechnics* 32, pp. 304-315, 2005.
- [16] Ö. BOZOK, «RESPONSE OF MICROPILES IN EARTH SLOPES FROM LARGE-SCALE,» University of Missouri-Columbia, Missouri, 2009.
- [17] A. Z. BOECKMANN, «LOAD TRANSFER IN MICROPILES FOR SLOPE STABILIZATION FROM,» University of Missouri-Columbia, Missouri, 2006.
- [18] INVIAS, «RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN) INV E – 142 – 13,» INVIAS, BOGOTÁ D.C., 2013.
- [19] D. F. Barrios Carvajal, «ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DE DEPÓSITOS DE RELAVES CON MUROS DE MATERIAL DE EMPRÉSTITO SOMETIDOS A SISMOS CHILENOS,» UNIVERSIDAD DE CHILE, Santiago de Chile, 2019.
- [20] J. L. S. L. S. Jeong, «Coupled effect of soil nail/slope systems,» *J. KGS* 21, nº 2, pp. 127-135, 2005.
- [21] S. H. Y. L. Y. W. X. Li, «Numerical studies of the position of piles in slope stabilization,» *Geomech. Geoen.: Int. J.* 6 (3), p. 209–215, 2011.