



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**MODELACIÓN NUMÉRICA USANDO ELEMENTOS FINITOS EN 2  
DIMENSIONES PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE MUROS ANCLADOS  
FRENTE AL METODO TRADICIONAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de INGENIERO CIVIL

AUTOR: MARIO GUSTAVO PUEBLA REYES  
TUTOR: FREDDY ISRAEL RODRÍGUEZ BADILLO

Quito-Ecuador  
2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Mario Gustavo Puebla Reyes con documento de identificación N° 1754052775  
manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la  
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera  
total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



---

Mario Gustavo Puebla Reyes

1754052775

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Mario Gustavo Puebla Reyes con documento de identificación N° 1754052775, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Modelación numérica usando elementos finitos en 2 dimensiones para optimizar el diseño de muros anclados frente al método tradicional”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de agosto del 2024

Atentamente,



---

Mario Gustavo Puebla Reyes

1754052775

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N° 1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MODELACIÓN NUMÉRICA USANDO ELEMENTOS FINITOS EN 2 DIMENSIONES PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE MUROS ANCLADOS FRENTE AL MÉTODO TRADICIONAL, realizado por Mario Gustavo Puebla Reyes con documento de identificación N° 1754052775, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de agosto del 2024

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, reading "Freddy Rodríguez B.", is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and includes a large, sweeping flourish above the name.

---

Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc.

1720094026

## **DEDICATORIA**

Dedico el siguiente trabajo a mis padres, que me apoyaron hasta el final con su cariño, consejos y solidaridad, a mi hermano como un eje principal en mi vida, a mi abuelito Cesar por ser una voz que me guio durante toda mi carrera, a mi abuelita Consuelo por ser el cariño incondicional que siempre estuvo para mí, a mi abuelito Mario que en paz descanse por ser a la persona a la que más recurro a pesar de su falta, a mi abuelita Ivone por siempre ser una voz de consejo y apoyo, y por ultimo pero no menos importante a mi tutor Freddy Rodríguez por ser el apoyo académico durante toda la elaboración del presente trabajo.

Mario Gustavo Puebla Reyes

# **MODELACIÓN NUMÉRICA USANDO ELEMENTOS FINITOS EN 2 DIMENSIONES PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE MUROS ANCLADOS FRENTE AL MÉTODO TRADICIONAL**

## **NUMERICAL MODELING USING FINITE ELEMENTS IN 2D TO OPTIMIZE THE DESIGN OF ANCHORED WALLS COMPARED TO THE TRADITIONAL METHOD**

Mario Puebla – Reyes<sup>1</sup>, Freddy Rodríguez – Badillo<sup>2</sup>

### **Resumen**

El presente artículo analizó el diseño de un muro anclado mediante el uso de la teoría de empujes simplificados a lo cual se hace referencia como “El método tradicional” y como este diseño puede ser revisado y mejorado utilizando la técnica de modelación numérica de elementos finitos en 2D, ambos se realizaron utilizando las mismas consideraciones y mismos aspectos de suelo a anclar, para posteriormente revisar los diseños conseguidos por cada uno de los métodos obteniendo mejoras en la estabilidad del talud frente al suelo natural, se comparó también resultados como la geometría de cada anclaje, el cumplimiento de las normas establecidas para el diseño de anclajes creada por el Eurocodigo, diagramas de esfuerzos y como estos varían según el avance de la excavación y deformaciones presentadas por el muro anclado debido al suelo, cabe aclarar que para dicho método se realizaron modelaciones para casos de anclajes tanto pasivos como activos. Con dichos resultados se compararon elementos que puedan poner en evidencia sus cambios y/o mejoras conseguidas, además de un análisis económico mediante APUS con el fin de expresar cambios en el ámbito económico constructivo.

### **Abstract**

The present paper analyzes the design of an anchored wall using simplified thrust theory, often referred to as "the traditional method." Recognizing the potential for enhancement through 2D finite element numerical modeling, both approaches were applied under identical conditions and soil characteristics. This allowed for a comparative review of the designs generated by each method. The study demonstrated improvements in slope stability compared to natural soil conditions. Additionally, comparisons were made in terms of anchor geometry, adherence to Eurocode standards for anchor design, stress distribution diagrams, and variations in stress due to excavation progress and deformations in the anchored wall caused by soil conditions. It is noteworthy that the modeling included both passive and active anchors. The results enabled a comprehensive comparison, highlighting changes and improvements. Furthermore, an economic analysis was conducted using APUS to illustrate the economic impacts of the construction modifications.

**Palabras clave:** muros anclados, anclajes, modelación numérica, elementos finitos, APUS, geometría de anclajes.

**Keywords:** anchored walls, anchors, numerical modeling, finite elements, APUS, anchor geometry.

## 1. Introducción

La historia de los muros anclados se remonta al desarrollo de las civilizaciones, dichos muros surgieron para contrarrestar desafíos de estabilidad del suelo en excavaciones. Según Schorl [1] En el siglo XIX, Karl Terzaghi desarrolló la teoría de presión lateral para mejorar el diseño de estructuras de contención y el uso de anclajes para la estabilidad de suelos propensos a fallar.

A finales del mismo siglo, Henri Vidal introdujo las primeras estructuras de contención reforzadas con anclajes en el suelo, los cuales servían para evitar deslizamientos de tierra y sostener terrenos inclinados.

La necesidad de muros anclados diseñados de manera óptima se mantiene presente puesto que los métodos convencionales utilizados en la actualidad para el análisis y diseño suelen idealizar el diagrama de esfuerzos horizontales, con el objetivo de simplificar los cálculos.

Aunque estos métodos arrojan resultados aceptables en términos de cálculo y diseño, la simplificación de los empujes conlleva a una incertidumbre significativa sobre posibles sub o sobre dimensionamientos. Esta incertidumbre puede resultar en un encarecimiento de las obras debido a muros más robustos de lo necesario y anclajes demasiado grandes y largos, o en el peor de los casos una posible falla causada por muros demasiado esbeltos, anclajes demasiado cortos o de diámetro menor al necesario.

Estos problemas pueden derivar de la falta de consideración de varios factores importantes en los cálculos del método tradicional, como las deformaciones causadas por las propiedades elásticas del suelo y los cambios continuos en el diagrama de esfuerzos durante el avance de la excavación. Además, el enfoque tradicional, que trata al muro como una viga simplemente apoyada sobre un medio elástico, representa una idealización en el diseño de los anclajes.

Por dichas razones se puso a consideración un método que disminuya dichos factores que

pueden alterar las dimensiones y funcionalidad del muro anclado, la modelación numérica con elementos finitos dio la solución a estos problemas gracias a que en este método se puede utilizar la técnica de mallado, la cual divide una masa de suelo en espacios geométricos más pequeños y analiza como cada uno de dichos elementos es afectado por sus propiedades físicas, mecánicas y elementos aledaños, el caso de estudio siguió el mismo procedimiento para conocer sus esfuerzos, deformaciones y demás parámetros a considerar con el objetivo de diseñar muros anclados más eficientes, partiendo de conocer dichos parámetros se ajustaron las medidas tanto de la pantalla del muro y de los anclajes para conseguir la máxima eficacia en su funcionamiento, dinero al momento de su construcción principalmente factor de seguridad conseguido.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Estratigrafía

En el campo de la geología y la geotecnia, los estratos son capas distintivas de suelo o roca que se forman de manera natural a lo largo del tiempo debido a procesos geológicos como la sedimentación y la deposición. Gracias al ensayo SPT (ensayo de penetración estándar) realizado en la zona de estudio se consiguió dicha estratificación, la cual consiste en un estrato desde el nivel 0m hasta el nivel 11m de un limo de baja plasticidad y desde el nivel 11m hasta el nivel final de la excavación de 12m de una arena limosa dando el siguiente esquema:

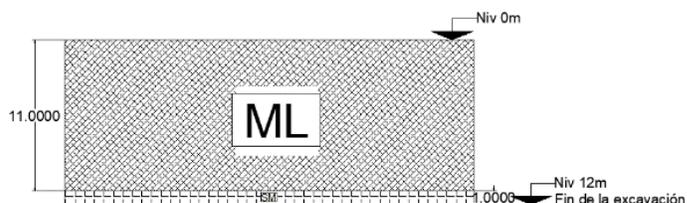


Figura 1: Esquema estratificación real.

Las propiedades mecánicas y físicas del suelo a anclar se consiguieron mediante las muestras (testigos) de suelo previamente obtenidas mediante el uso del tubo Shelby, dichas muestras se ensayan mediante varios tipos de pruebas como por ejemplo el ensayo triaxial UU, el cual es una

técnica que permite evaluar las propiedades mecánicas de los testigos de suelo, bajo condiciones controladas de esfuerzo.

Analizando las muestras de suelo de la zona de estudio se consiguieron parámetros necesarios para el diseño de los muros anclados como el ángulo de fricción, el peso específico, el módulo de elasticidad y la cohesión existentes en dicha zona.

Tabla 1: Propiedades del suelo.

Estrato	Cohesión (KPa)	Angulo de fricción (grados)	Peso específico (KN/m3)	Módulo de elasticidad inicial (KPa)
ML	30	9	16,8	4000
SM	110	27	18,3	4000

## 2.2 Propiedades de materiales de muro y anclajes

Los materiales deberán contar con parámetros que cumplan con las sollicitaciones del caso, dichos parámetros deberán ser: “Fyk” que se refiere a la tensión de fluencia del acero, siendo el nivel de esfuerzo que una sección puede soportar antes de deformarse permanentemente, “Fpk” momento en que el elemento de acero alcanza su esfuerzo de rotura; y, “Fck” que es la capacidad del hormigón para soportar cargas de compresión antes de que ocurra la falla por aplastamiento. Se requiere conocer los valores de cada uno de estos parámetros y con qué fin serán utilizados debido a que estos valores cambiaran dependiendo si son utilizados en los anclajes o en la pantalla de hormigón, dichos valores se consiguen a partir de catálogos a elección del diseñador.

Teniendo en cuenta el acero A60 que será utilizado para anclajes y los materiales necesarios para la construcción de la pantalla de hormigón, nuestros parámetros escogidos serán:

Tabla 2: Propiedades de los materiales.

Propiedad	Anclaje	Pantalla
Fyk(kg/cm2)	4200	4200
Fpk(kg/cm2)	5600	5600
Fck(kg/cm2)	240	180

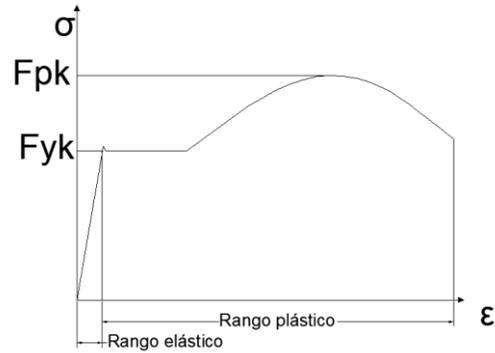


Figura 2: Esquema esfuerzo vs deformación del acero.

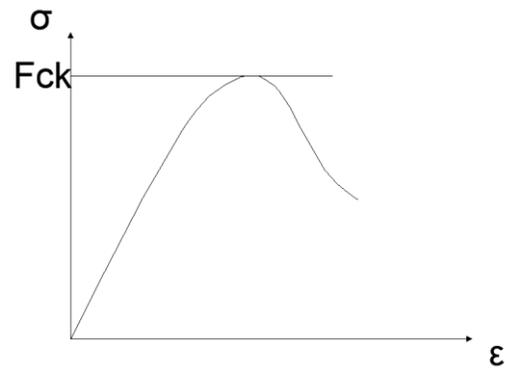


Figura 3: Esquema esfuerzo vs deformación del hormigón.

Con dichos parámetros de materiales previamente explicados, es necesario realizar el diseño de la pantalla de hormigón para el caso presente, esto con el fin de conseguir un área de acero ( $A_s$ ) requerida para soportar los momentos máximos que se lleguen a presentar y una sección lo suficientemente robusta que soporte las fuerzas cortantes presentadas por las sollicitaciones de cargas, completando el diseño del muro anclado, esto mediante las fórmulas:

$$a = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 * Mu}{\phi f * 0.85 * f'c * d}} \quad (1)$$

$$A_s = \frac{0.85 * f'c * a * b}{f_y} \quad (2)$$

$$V_n = \frac{V_u}{\phi_l} \quad (3)$$

En donde:

d= Altura efectiva de la sección.

h= Altura total de la sección.

A<sub>s</sub>= Área de acero requerida.

V<sub>n</sub>= Cortante nominal de la sección.

Φ<sub>f</sub>, φ<sub>l</sub>= factores de reducción.

### 2.3 Diseño de muros mediante método tradicional.

Basándose en la teoría de empujes simplificados en puntales, la cual se rige por diferentes condiciones y se puede aplicar en el diseño de anclajes, se determina la figura que representa la sollicitación de carga, dependiendo de las características presentes en el suelo.

#### 2.3.1 Sollicitaciones de carga en muro anclado.

Tomando en cuenta la teoría de los empujes simplificados en puntales antes mencionados se aplicará las condiciones establecidas por Peck (1969) para los diagramas de empujes laterales ya sean en arenas o en arcillas suaves, medias o firmes.

#### • Condiciones

- En el caso de cortes en arena se usará σ con su respectivo diagrama simplificado (figura 5, figura a).
- Para cortes en arcillas dependerá de una condición que dictará el uso del empuje σ con sus respectivos diagramas de empujes simplificados:

- Se usará σ (figura 4, figura b) si:

$$\gamma * \frac{H}{c} > 4 \quad (4)$$

- Se usará σ (figura 4, figura c) si:

$$\gamma * \frac{H}{c} < 4 \quad (5)$$

#### • Ecuaciones de esfuerzos de empujes simplificados:

$$\sigma = 0,65\gamma H K a \quad (6)$$

Ecuación de envolvente de presión idealizado para arenas (figura 4, figura a).

$$\sigma = \gamma H \left( 1 - \left( \frac{4c}{\gamma H} \right) \right) \quad (7)$$

Ecuación de envolvente de presión idealizado para arcillas suaves y medias (figura 4, figura b).

$$\sigma = 0,2\gamma H \text{ a } 0,4\gamma H \quad (8)$$

Ecuación de envolvente de presión idealizado para arcillas duras (figura 4, figura c).

En donde:

γ = peso unitario del suelo

H= altura del corte

Ka= coeficiente de presión activa por Rankine=

$$\tan^2 \left( 45 - \frac{\theta}{2} \right) \quad (9)$$

C= cohesión no drenada.

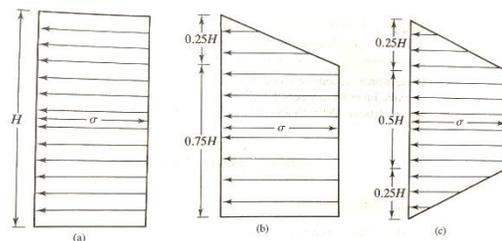


Figura 4: Diagramas de empujes simplificados. [2]

Una vez considerado el diagrama correspondiente se procede a analizar el muro como la viga simplemente apoyada que fue previamente mencionada, de este análisis se consiguen las diferentes reacciones dependiendo de la cantidad de anclajes que se aplicó para el terreno, dichas reacciones son analizadas individualmente por tramos de la viga

consiguiendo 2 fuerzas en cada apoyo central, dichas fuerzas son sumadas, resultando en la reacción total de dicho apoyo, una vez determinada cada reacción se procede a multiplicar cada una por su separación, y dividirlo para el coseno de su ángulo de inclinación, esto para conseguir la fuerza total que cada anclaje deberá resistir.

$$S_{in} = An^1 + \frac{An^2 - An^1}{2} \quad (10)$$

$$S = \frac{An_n - An_{n-1}}{2} + \frac{An_{n+1} - An_n}{2} \quad (11)$$

$$S_{fn} = \frac{An_x - An_{x-1}}{2} + (H - An_x) \quad (12)$$

$$Pa = A * S \quad (13)$$

$$Pb = (B1 + B2) * S \quad (14)$$

$$Pc = (C2 + C1) * S \quad (15)$$

$$Pd = (D2 + D1) * S \quad (16)$$

$$Pe = (E2 + E1) * S \quad (17)$$

$$Pf = F * S \quad (18)$$

$$Fuerza An = \frac{RAn * S}{\cos(\alpha)} \quad (19)$$

En donde:

A, B1, B2, C2, C1, D2, D1, E2, E1, F= reacciones conseguidas de la resolución de la viga simplemente apoyada.

S= Separación entre cada anclaje.

S<sub>in</sub>= Separación conseguida para el primer anclaje colocado.

S<sub>fn</sub>= Separación conseguida para el ultimo anclaje colocado.

An<sub>1</sub>=Profundidad del primer anclaje colocado.

An<sub>2</sub>=Profundidad del segundo anclaje colocado.

An<sub>n</sub>=Profundidad anclaje analizado.

An<sub>n-1</sub>=Profundidad del anclaje anterior al analizado.

An<sub>n+1</sub>=Profundidad del anclaje posterior al analizado.

An<sub>x</sub>= Profundidad del anclaje final.

An<sub>x-1</sub>= Profundidad del anclaje anterior al final.

H=Profundidad final de la excavación.

Ran=Reacción en el anclaje analizado.

α=Ángulo de inclinación del anclaje analizado con respecto a la horizontal.

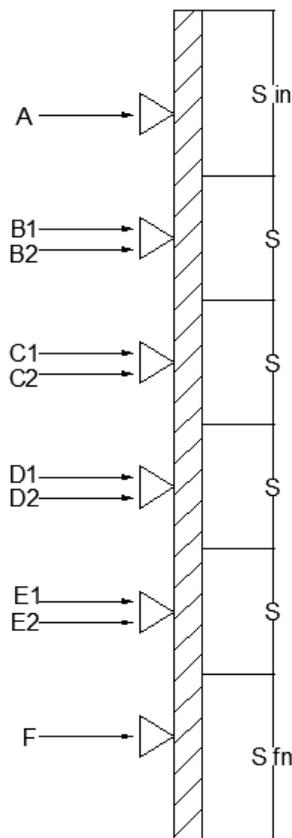


Figura 5: Esquema reacciones de la teoría de resolución de muro anclado como viga simplemente apoyada.

### 2.3.2 Diseño de anclajes

Se busca solventar las solicitaciones de carga presentadas por el suelo, además de posibles métodos de falla de los anclajes, como puede ser:

- Tensión admisible del acero del tirante.
- Deslizamiento del tirante en la lechada dentro del anclaje.
- Arrancamiento del anclaje.

La estabilidad y seguridad de los anclajes se consigue mediante el diseño de la geometría del anclaje, para esto se basa en las ecuaciones recuperadas de (Serie guías Eurocódigos,2001).

- **Carga mayorada**

Es importante resaltar que se incrementa las cargas actuantes en los anclajes con el fin de mantener un factor de seguridad, el cual puede variar según el tiempo de uso del anclaje, siendo permanente (vida útil mayor a 2 años) o provisional (vida útil menor a 2 años), cabe aclarar que los en la NEC [3] (norma Ecuatoriana de la construcción) dichos tiempos se ven reducidos, siendo permanente (vida útil mayor a 6 meses) o provisional (vida útil menor a 6 meses), la carga mayorada nominal busca mantener la integridad del anclaje frente a los 3 casos antes mencionados.

$$Pnd = F1 * Pn \quad (20)$$

En donde:

F1= factor de mayoración 1,5(permanentes), 1,2(provisionales).

Pn=carga nominal del anclaje.

Pnd= carga nominal mayorada del anclaje.

- **Tensión admisible del acero**

Para la comprobación de la tensión admisible del acero se deberá minorar las tensiones admisibles tanto para rotura como para flexión del acero conseguidas por catálogo, esto con el fin de evitar que el acero de los anclajes sufra deformaciones permanentes debido a las cargas que el suelo a anclar presenta, se compara con la carga mayorada dividida entre el área de acero del anclaje.

**Provisionales:**

$$\frac{Pnd}{At} < \frac{Fpk}{1,25} \quad (21)$$

$$\frac{Pnd}{At} < \frac{Fyk}{1,10} \quad (22)$$

**Permanentes:**

$$\frac{Pnd}{At} < \frac{Fpk}{1,30} \quad (23)$$

$$\frac{Pnd}{At} < \frac{Fyk}{1,15} \quad (24)$$

En donde:

Pnd= Carga nominal mayorada del anclaje.

At= Sección del tirante.

Fyk= Limite elástico del acero del tirante.

Fpk= Limite de rotura del acero del tirante.

- **Deslizamiento del tirante en la lechada dentro del anclaje**

Para la comprobación de la seguridad de deslizamiento del tirante dentro del anclaje se debe minorar la adherencia límite que existe entre el tirante y la lechada de hormigón que rodea al anclaje con el fin de comparar el esfuerzo admisible con el actuante.

$$\frac{Pnd}{Lb * Pt} < \frac{\tau lim}{1,2} \quad (25)$$

$$\tau lim = 6,9 * \left( \frac{Fck}{22,5} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (26)$$

$$Pt = 2 * \sqrt{\pi * At} \quad (27)$$

En donde:

$\tau lim$ = Adherencia límite entre el tirante y la lechada en Mpa.

Pnd= Carga nominal mayorada de cada anclaje.

Pt= Perímetro nominal del tirante.

Lb= Longitud de cálculo efectiva de cada anclaje.

Fck= Resistencia a la compresión de la lechada a los 28 días en Mpa.

- **Arrancamiento del anclaje**

Para la comprobación de arrancamiento del anclaje se deberá minorar la adherencia límite del terreno, esto con el fin de obtener la adherencia admisible que se compara con la actuante.

$$\frac{Pnd}{\pi * Dn * Lb} < Aadm \quad (28)$$

$$Aadm = \frac{c'}{F2c} + \sigma' * \frac{tg(\varphi')}{F2\varphi} \quad (29)$$

En donde:

$P_{nd}$ = Carga nominal mayorada de cada anclaje.

$D_n$ = Diámetro nominal del anclaje.

$L_b$ = Longitud de cálculo efectiva del anclaje.

$A_{adm}$ = Adherencia permisible frente al deslizamiento o arrancamiento del terreno que rodea al anclaje.

$c'$ = Cohesión efectiva del terreno en contacto con el anclaje.

$\phi'$ =Ángulo de fricción interno del terreno en contacto con el anclaje.

$\sigma'$ = Presión efectiva del terreno en el centro del anclaje más una tercera parte de la presión de inyección aplicada.

$F_{2c}$  = 1,60; coeficiente de minoración de la cohesión.

$F_{2\phi}$  = 1,35; coeficiente de minoración de la fricción.

## 2.4 Modelación numérica en 2D

La modelación numérica es un método utilizado para simular el comportamiento de sistemas físicos, procesos naturales o fenómenos mediante el uso de ecuaciones matemáticas y algoritmos computacionales. Según Takahashi [4] Un modelo numérico es una representación teórica de un fenómeno natural, típicamente expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento.

Este tiene la capacidad de analizar sistemas geotécnicos, dividiéndolos en una serie de elementos geométricos más pequeños, lo que permite representar como se comportarán de manera aproximada a través de modelos matemáticos.

Estos modelos se resuelven mediante computadoras utilizando métodos numéricos finitos, como elementos, volúmenes y diferencias. Finalmente se combina los resultados conseguidos en cada uno de los elementos obteniendo una solución global.

### 2.4.1 Método de elementos finitos en 2D

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica de solución dentro de la modelación numérica.

En el ámbito de la geotecnia este es utilizado para determinar como una masa de suelo será afectada por diferentes cargas dependiendo de sus propiedades internas como su peso específico, su ángulo de fricción y su cohesión.

Este método separa el sistema en pequeñas subdivisiones geométricas conectadas entre sí a través de nodos, formando una malla de elementos finitos que representa la geometría general del sistema.

Cada uno de estos elementos finitos se modela utilizando ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento físico, como ecuaciones de equilibrio, leyes de conservación o ecuaciones constitutivas que gobiernan el material.

Estas ecuaciones se resuelven con el fin de obtener parámetros como deformaciones y esfuerzos del sistema. Álvarez [5] afirma que el método de elementos finitos permite resolver problemas complejos mediante la discretización del dominio en elementos más simples, lo que facilita la aplicación de métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas.

Al combinar la contribución de todos los elementos, se obtiene una solución global que representa el comportamiento del sistema completo. Normalmente las ecuaciones utilizadas por el programa para determinar los resultados deseadas son:

$$\int_v [B]^T [C][B] dv \{a\} = b \quad (30)$$

$$\int_v \langle N \rangle^T dv + p \int_A \langle N \rangle^T dA + \{Fn\} \quad (31)$$

Recuperado de (Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W, 2013).

En donde:

[B]= matriz de deformación-desplazamiento

[C]= matriz constitutiva

{a}= vector columna de desplazamientos nodales en “X” y “Y”

<N>= vector fila de funciones de interpolación

A= área a lo largo del elemento

v= volumen del elemento

b= magnitud de la fuerza del cuerpo

p= presión superficial

{Fn}= cargas nodales concentradas

#### 2.4.2 Componentes del modelado

Estos componentes son los necesarios para elaborar el modelo de manera adecuada para que los resultados que se obtengan tengan sentido con el caso de estudio.

Debido a que los métodos numéricos en sí son una herramienta muy bondadosa necesitan de igual manera que los datos ingresados en los diferentes componentes que conforman el modelo sean igual de bondadosos, por esto se debe hacer hincapié en cada uno de ellos.

- **Mallado**

El mallado, se encarga de discretizar la geometría general del sistema en unidades de menor tamaño.

Esto permite analizar cómo cada uno de estos elementos responde a sus parámetros internos y a condiciones externas, como la instalación de anclajes o excavaciones.

La combinación de los efectos individuales de cada elemento determina el comportamiento global del sistema.

- **Condiciones de borde**

Las condiciones de borde son de suma importancia, ya que definen el comportamiento del modelo en los límites del dominio simulado.

Estas condiciones permiten al software establecer que, aunque no se modelen explícitamente ciertas regiones, se debe considerar el comportamiento continuo del elemento en el sistema. En otras palabras, idealiza la continuidad del suelo asegurando que el modelo no se trate como un sistema aislado.

- **Configuración de los anclajes**

Para la implementación de anclajes en el software es necesario establecer cuáles serán los parámetros y geometría que dichos anclajes tendrán, siendo los parámetros necesarios:

**Diámetro:** Sera el escogido por el diseñador basándose en las solicitaciones de carga presentadas por el terreno y el disponible según el catálogo del fabricante.

**Área:** Será la sección transversal que aportará el diámetro escogido por el diseñador.

**Módulo de elasticidad:** Es la capacidad que tendrá el anclaje escogido de deformarse sin presentar daños, esta dependerá del tipo de acero escogido para la construcción.

**Fuerza preaxial:** Esta será un porcentaje de la fuerza total que cada anclaje presenta, dependiendo de si los anclajes escogidos serán activos o pasivos tendrán o no dicha fuerza previa desde el momento de su instalación.

**Separación:** Será el espaciamiento presentado entre cada anclaje debido a la configuración escogida por el diseñador, esto aumentará o reducirá la fuerza que cada anclaje deberá presentar.

- **Modelo constitutivo**

El modelo Mohr-Coulomb asume una dilatación continua durante la falla. En la realidad, el suelo puede experimentar una dilatación inicial cuando

un esfuerzo aplicado alcanza el límite de fluencia, pero eventualmente alcanza una condición de volumen constante al aumentar las deformaciones.

Además, los suelos dilatantes suelen mostrar un incremento rápido en la resistencia al corte hasta un valor máximo con un pequeño aumento en la deformación de corte, seguido de una disminución en la resistencia al corte con deformaciones crecientes (es decir, ablandamiento por deformación), hasta llegar a un valor constante conocido como estado crítico.

En el estado crítico, el esfuerzo cortante ya no cambia con deformaciones continuas, considerado una envolvente de falla máxima no lineal, el fallo por dicho método puede ser expresado como:

$$Tf = c + \sigma n * \tan(\phi m) \quad (32)$$

$$\phi m = \phi cs + \Psi m \quad (33)$$

En donde:

c= cohesión efectiva.

$\sigma n$ = esfuerzo normal.

$\Phi m$ =ángulo de fricción efectivo movilizado.

$\Phi cs$ =ángulo de fricción crítico

$\Psi m$ =ángulo de dilatación movilizado

Teniendo esto en cuenta el fallo por dicho método convierte la relación esfuerzo/dilatación vinculando el ángulo de fricción movilizado con el ángulo de dilatación, todo esto asumiendo un ángulo de fricción en estado crítico constante.

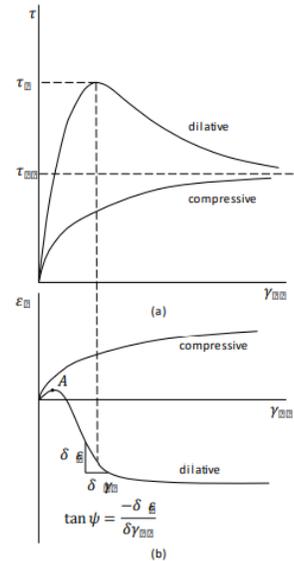


Figura 6: Esquema crítico por esfuerzo cortante en suelo para modelo de endurecimiento/ablandamiento de Mohr-Coulomb. [5]

## 2.5 APUS

APUS es el acrónimo de "Análisis de Precios Unitarios".

Los APUS a realizar son documentos detallados que desglosan y cuantifican costos directos del caso de estudio como los materiales, la mano de obra, los equipos y el transporte necesario para llevar a cabo el proyecto, con el fin de resaltar las mejoras conseguidas al modelar con elementos finitos frente a diseñar con el método tradicional, en dichos APUS se tomó en cuenta solo la construcción del muro anclado, es decir que se excluyó valores como la excavación y ensayos previos a la construcción de dicho muro, se toma en cuenta costos indirectos de construcción de 10% con el fin de asemejar costos reales.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Método tradicional

Tomando en cuenta los parámetros del suelo previamente señalados se adoptó la disposición de los anclajes contando como nivel 0m al nivel de la superficie y nivel -12m como final de la excavación, resultando en una disposición de anclajes que mantiene un espaciamiento entre el inicio de la excavación y el primer anclaje de 1m, de igual manera se mantuvo un espaciamiento entre el último anclaje y el final de la excavación de 1m, para el caso de anclajes intermedios se mantuvo un espaciamiento de 2m entre cada uno.

Posteriormente a conocer las profundidades a la que cada anclaje será colocado se consiguió la separación que cada uno tendrá, para de esta manera conocer la cantidad de fuerza a soportar.

Una vez determinadas cada una de estas separaciones para todos los anclajes se procedió a utilizar la teoría de la viga simplemente apoyada, en la cual utilizando las ecuaciones de equilibrio estático como sumatoria de momentos y sumatoria de fuerzas en sentido vertical se consiguieron las reacciones para cada uno de los anclajes, que simulan ser apoyos, finalmente, para conseguir la fuerza total aplicada en cada uno de los anclajes es necesario tomar en cuenta la separación entre anclajes previamente conseguida, además del ángulo de inclinación de cada anclaje, que para este caso será de 10° con respecto a la horizontal, estos factores se implementaron en el cálculo de las fuerzas mediante la aplicación de las fórmulas expresadas anteriormente, dando como resultado los siguientes valores de reacciones en la viga simplemente apoyada y fuerzas en anclajes:

Tabla 3: Fuerzas en los anclajes.

Anclaje	Profundidad(m)	Separación(m)	Reacción(kN/m)	Fuerza anclajes (kN)
A	-1	2	29,655	60,226
B	-3	2	69,196	140,526
C	-5	2	79,081	160,602
D	-7	2	79,081	160,602
E	-9	2	69,196	140,526
F	-11	2	29,655	60,226

Con el fin de mantener un factor de seguridad al momento del diseño, se mantuvo un factor de mayoración con respecto a las cargas actuantes en los anclajes.

Tabla 4: Cargas mayoradas en anclajes.

Anclaje	Carga mayorada (kN)
A	90,338
B	210,79
C	240,902
D	240,902
E	210,79
F	90,338

Con dichos valores se determinó la geometría necesaria para resistir las sollicitaciones de carga, para conseguirlo se utilizaron las ecuaciones recuperadas del Eurocodigo que se expresaron anteriormente.

Tabla 5: Condiciones de carga actuante en anclajes por método tradicional.

Anclaje	Tensión Actuante (kN/m <sup>2</sup> )	Deslizamiento Actuante (kN/m <sup>2</sup> )	Arrancamiento Actuante (kN/m <sup>2</sup> )
A	1,467e5	315,996	58,986
B	3,432e5	479,26	86,462
C	3,408e5	587,598	117,52
D	3,408e5	710,015	142,003
E	3,423e5	921,654	172,042
F	1,467e5	513,493	95,852

Con los valores actuantes determinados, se calculó los esfuerzos admisibles para ser comparados.

Tabla 6: Esfuerzos admisibles en anclajes.

Anclaje	FYK (kN/m <sup>2</sup> )	FPK (kN/m <sup>2</sup> )	Tlim (kN/m <sup>2</sup> )	Aadm (kN/m <sup>2</sup> )
A	3,58e5	4,422e5	4,6e3	59,672
B	3,58e5	4,422e5	4,6e3	90,758
C	3,58e5	4,422e5	4,6e3	118,418
D	3,58e5	4,422e5	4,6e3	145,934
E	3,58e5	4,422e5	4,6e3	173,094
F	3,58e5	4,422e5	4,6e3	200,824

Dichos valores se consiguieron con la siguiente geometría.

Tabla 7: Geometría conseguida para anclajes

ANCLAJE	LONGITUD(m)	Diámetro(mm)
A	13,341	28
B	13,584	28
C	11,416	30
D	9,169	30
E	6,661	28
F	4,554	28

Con las dimensiones expresadas se consiguió el diseño de anclajes que cumplen con las solicitaciones de carga necesarias para el caso de estudio mediante método tradicional.

### 3.2 Resultados del dimensionamiento de la pantalla de hormigón

Con ayuda de las fórmulas antes expresadas, se realizó el diseño de una pantalla de hormigón que cumpla con los requerimientos del caso, para esto se buscaron las dimensiones de la pantalla, el área de acero necesaria y la comprobación del cortante de la sección, tomando en cuenta los valores de momento ultimo y de cortante ultimo conseguidos mediante el software de diseño de secciones. dando los siguientes resultados:

Tabla 8: Solicitaciones para la pantalla de hormigón.

Momento ultimo presente en la sección (kN*m)	13,2
Cortante ultimo presente en la sección (kN)	39,7

Dichas solicitaciones para la pantalla fueron solventadas con el siguiente diseño:

Tabla 9: Geometría de la sección.

Ancho de la sección (cm)	20
Área de acero requerida (cm <sup>2</sup> )	2,71

Numero de varillas por sección	4
Cortante nominal de la sección (kN)	161,894

Con el diseño de sección expresado en la tabla 11 se contrarresta las solicitaciones presentes en el caso, consiguiendo un área de acero suficiente para el momento presente y un cortante nominal superior al cortante último en el caso.

### 3.3 Método de modelación numérica.

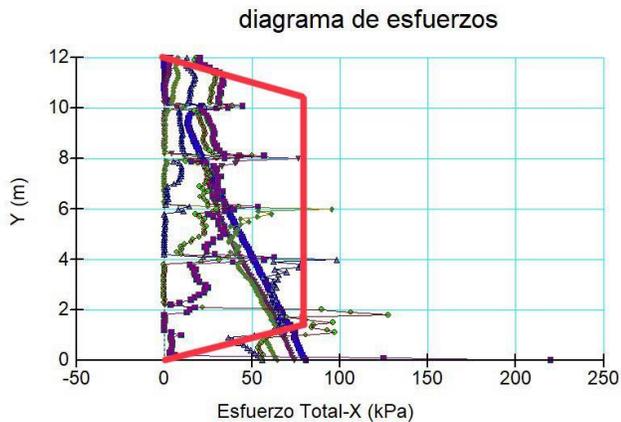
Para la modelación con elementos finitos se decidió realizar un caso tanto de anclajes pasivos como de activos, debido a la búsqueda del diseño más optimo.

Se comenzó el desarrollo de la modelación numérica con elementos finitos del caso de estudio a partir de los datos recolectados, las consideraciones del terreno y lo aprendido sobre el software.

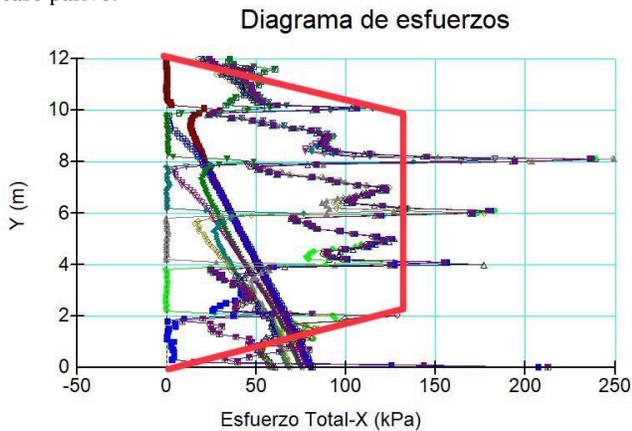
Para esto se tomaron los componentes previamente explicados apoyándose en el siguiente proceso: se comienza dibujando el terreno que se desea modelar, posteriormente se establece condiciones de borde para expresar la continuidad del modelo sin necesidad de añadir elementos extra, se coloca el tipo de suelo en el software y se le añaden todos sus parámetros, así mismo se escoge el modelo constitutivo con el cual se desea trabajar, para este caso se utilizó endurecimiento/ablandamiento de Mohr-Coulomb, los parámetros de los materiales a utilizar tanto en la construcción de los anclajes y de la pantalla de hormigón se deben establecer en cada uno de sus respectivos campos dentro del software, posterior se deberá dividir el terreno modelado según la disposición de las excavaciones que se vayan a realizar, se debe ir retirando masas de suelo (simulando las excavaciones) y colocando tanto anclajes como muro, esto proceso se debe hacer por tramos, finalmente con el modelo completo, los anclajes y muro colocados y las excavaciones realizadas se manda al programa a calcular para obtener de esta manera los siguientes resultados:

### 3.3.1 Diagrama de esfuerzos

Los diagramas de esfuerzos horizontales conseguidos con la modelación numérica son las envolventes que se obtienen del programa tras el análisis, estos diagramas se van expresando progresivamente junto con el avance de la excavación, también se puede conocer el grafico de esfuerzos de toda la excavación.



**Figura 7:** Diagrama de esfuerzos general del caso de estudio en caso pasivo.

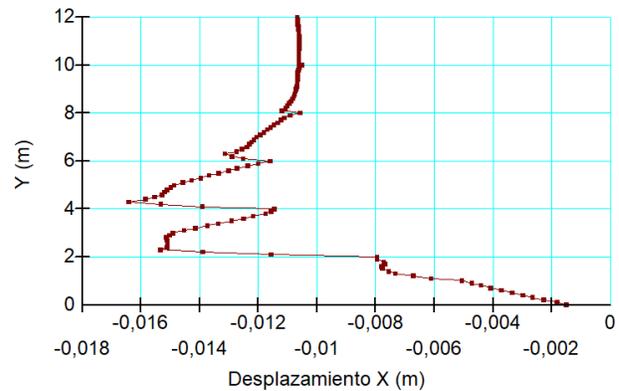


**Figura 8:** Diagrama de esfuerzos general del caso de estudio en caso activo.

Por último, para el caso pasivo y activo en la figura 7 y 8 se evidencia la similitud entre el diagrama de esfuerzos general conseguido con el software y el considerado para el diseño de anclajes mediante el método tradicional. Teniendo similitudes de resultados entre el caso de anclajes pasivos y el método tradicional, dichas semejanzas se aproximan de mejor manera cuando el valor de la constante utilizada en la fórmula de esfuerzo es de 0,2.

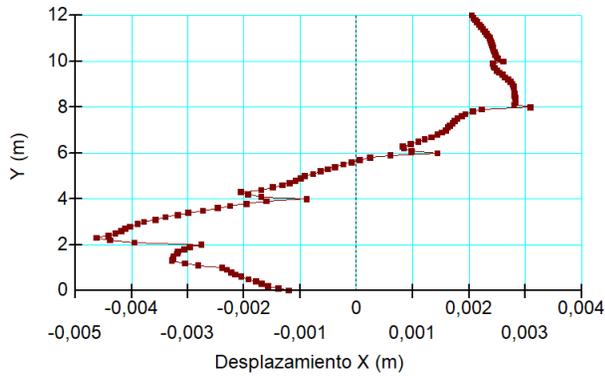
### 3.3.2 Deformaciones en x

Las deformaciones tanto para el caso de anclajes pasivos como activos conseguidos analizando la pantalla de hormigón y como se deformó, debido a la presión lateral ejercida por el suelo y a la colocación de los anclajes, dio como resultado el siguiente diagrama de desplazamientos para el caso pasivo:



**Figura 9:** Diagrama de desplazamientos conseguidos en el caso de anclajes pasivos.

En la figura 9 se puede comprobar que los desplazamientos usando anclajes pasivos alcanzan valores cercanos a 16mm en la parte baja del muro, lo cual representa deformaciones aceptables, a pesar de contar con resultados razonables, la inclusión de un caso activo de anclajes reduce aún más dichas deformaciones gracias a la inclusión del pretensado en el proceso constructivo del muro, tras el análisis con dichos anclajes se obtuvo el siguiente diagrama de deformaciones:



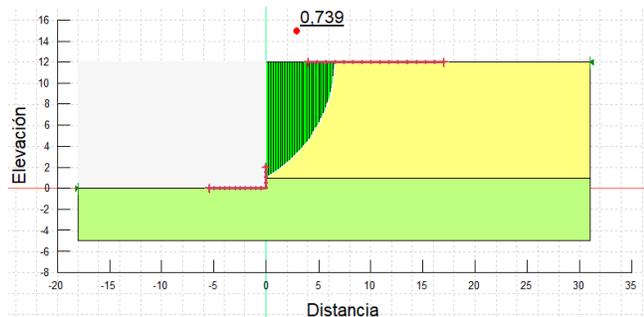
**Figura 10:** Diagrama de desplazamientos conseguidos en el caso de anclajes activos.

Comparando los resultados obtenidos, se evidencia que existe una reducción de deformaciones al momento de usar anclajes en estado activo, esto mejora el rendimiento del muro anclado debido a la ayuda en la integridad en la estructura de contención, en la figura 10 se demuestra la disminución de las deformaciones consiguiendo valores de alrededor de los 4,5mm en la parte baja del muro, representando una mejora constructiva con la inclusión de dicho caso activo.

### 3.3.3 Estabilidad del talud

Para la obtención de los factores de seguridad (Fs) se utilizaron análisis tenso deformacional, y análisis de equilibrio límite para analizar la estabilidad del talud, este factor de seguridad deberá ser mayor o igual a 1,5 [3] para considerarlo apropiado.

Al realizar el análisis mediante Bishop simplificado sin el refuerzo del muro anclado se obtiene:

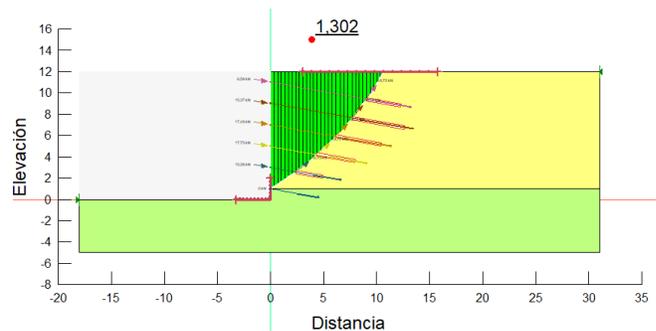


**Figura 11:** Factor de seguridad mediante Bishop simplificado sin refuerzo.

El factor de seguridad conseguido de la excavación al no existir sostenimiento mediante

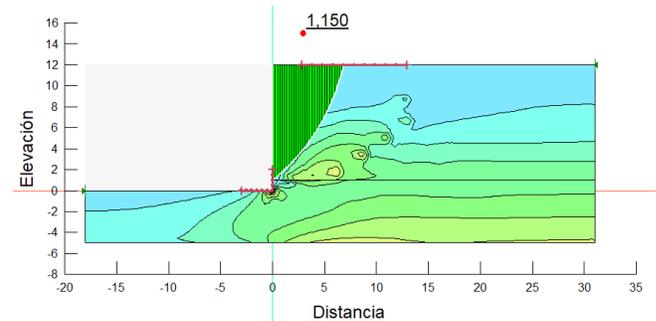
anclajes fue de 0,74, lo cual indica que la excavación es inestable.

El factor de seguridad analizando la resistencia del talud con anclajes en caso pasivo análisis de estabilidad mediante Bishop simplificado fue de 1,30, como se ve en la figura 12, lo cual muestra una mejora con respecto al talud sin sostenimiento, sin embargo, no cumple con el requerimiento de factor de seguridad de 1,5.



**Figura 12:** Factor de seguridad sin elementos finitos caso pasivo.

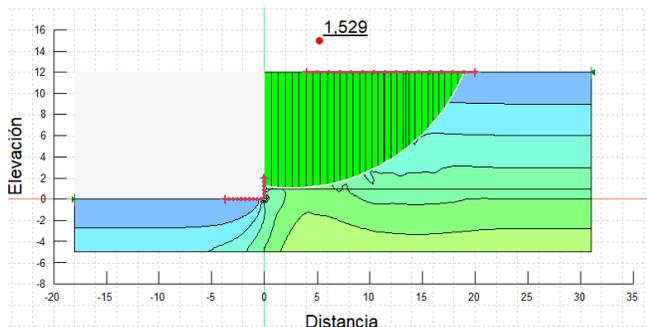
Para el caso de anclajes pasivos realizado el análisis de estabilidad mediante el análisis de métodos de elementos finitos se consiguió:



**Figura 13:** Factor de seguridad del talud mediante anclajes pasivos.

En la figura 13 la cual expresa el factor de seguridad del talud tras la colocación de anclajes pasivos, los cuales se puede notar que transmiten la carga experimentada al suelo, se obtuvo un valor de 1,15, el cual se asemeja al conseguido previamente sin análisis de elementos finitos, de igual manera este factor de seguridad no cumple con la condición antes mencionada, es por esto que, tras realizar el mismo análisis, pero con la inclusión de pretensado de anclajes para trabajar en

caso activo, el nuevo factor de seguridad conseguido fue:



**Figura 14:** Factor de seguridad del talud mediante anclajes activos.

En la figura 14 se puede observar que, con la inclusión de anclajes en estado activo, para los cuales se mantuvo un pretensado igual al 80% de su fuerza total, el factor de seguridad aumento significativamente hasta alcanzar un valor de 1,53, lo cual cumple con la condición necesaria de estabilidad de talud, esto demuestra que el pretensado de los anclajes ayuda con la estabilidad del talud, siendo lo óptimo para la estabilidad.

### 3.4 Comparaciones

Una vez expresados los resultados conseguidos tanto con el método tradicional como con el método de modelación numérica se llevó a cabo una recopilación de datos para denotar las diferencias y/o mejoras conseguidas, se evaluaron resultados como longitud y diámetro de anclajes, además de esfuerzos horizontales actuantes en la pantalla.

#### 3.4.1 Longitud de los anclajes

La longitud calculada para cumplir con los requerimientos de cargas debido al empuje del suelo mediante el método tradicional si cumplen con las solicitaciones de carga, es por esto que no se necesitaron cambios al momento de realizar la modelación numérica, se tomó en cuenta la longitud total de cada anclaje, es decir la suma de la longitud de falla debido al ángulo de falla de Rankine, la longitud efectiva y longitud de seguridad dando como resultado las siguientes longitudes

Tabla 10: Longitudes conseguidas para anclajes.

Anclaje	Longitud total(m)
A	13,4
B	13,6
C	11,5
D	9,2
E	6,7
F	4,6

#### 3.4.2 Diámetro de anclajes

En cuanto al diámetro de los anclajes, estos se diseñan con el objetivo de conseguir el área de acero necesaria para que cumpla con las solicitaciones de carga del caso, de esta manera los diámetros conseguidos mediante los diferentes métodos de diseño fueron:

Tabla 11: Diámetros conseguido mediante diferentes métodos de diseño.

Anclaje	Diámetro Método Tradicional (mm)	Diámetro Método Numérico Pasivo(mm)	Diámetro Método Numérico Activo(mm)
	A	28	28
B	28	28	28
C	30	28	28
D	30	28	28
E	28	28	28
F	28	28	28

En la tabla 11 se observa que los diámetros necesarios para cada anclaje diseñado por los diferentes métodos, no presento ningún cambio a excepción de los anclajes C y D los cuales requirieron una mayor área de anclaje para el método rígido, la poca variación de diámetros se dio debido a que estos podrían llegar a cambiar en los cálculos, aumentando un milímetro, a pesar de esto los diámetros comerciales restringieron el uso de anclajes a 30mm.

#### 3.4.3 Esfuerzos horizontales actuantes

Para el caso de los esfuerzos idealizados, las fórmulas previamente señaladas explican que para el diagrama considerado existe un rango de valores en cuanto al valor de la constante presente en la formula, lo cual incrementa o disminuye el valor de esfuerzos experimentado, tras realizar el cálculo de esfuerzos, los resultados conseguidos fueron:

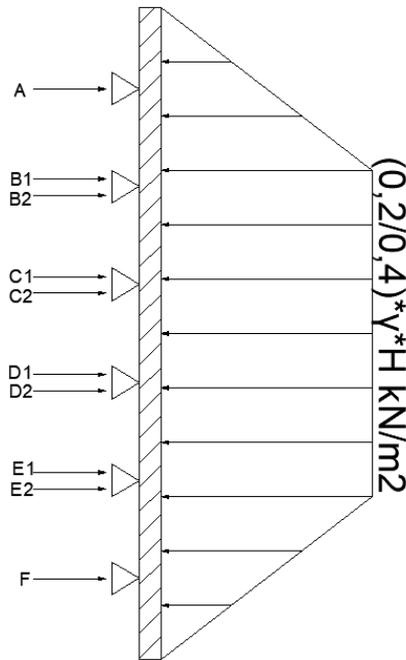


Figura 15: Diagrama de esfuerzos horizontales considerado en el método tradicional.

Aplicando los diferentes valores de la constante se obtuvo:

Tabla 12: Valores de esfuerzos horizontales mediante el método tradicional.

Valor de la constante	0,2	0,3	0,4
Esfuerzo Conseguido (kN/m <sup>2</sup> )	39,54	59,311	79,081

Tras analizar los esfuerzos expresados mediante programa, los máximos valores para ambos casos de anclajes fueron.

Tabla 13: Esfuerzos máximos conseguidos mediante el software para ambos casos de anclajes.

Esfuerzo máximo mediante anclaje pasivo. (kN/m <sup>2</sup> )	127,526
Esfuerzo máximo mediante anclaje activo. (kN/m <sup>2</sup> )	183,003

Para los casos de anclajes tanto pasivos como activos realizados mediante modelación numérica se encontró un incremento en los esfuerzos producidos por el suelo, a pesar de estos aumentos el diseño se puede considerar apropiado gracias a que el diagrama conseguido mediante la constante de 0,2 en la ecuación de esfuerzos es tratado como

un solo esfuerzo grande, lo cual compensa el aumento de valores en el método de modelación numérica, debido a que este no es continuo.

### 3.4.4 Fuerzas conseguidas en anclajes

Las fuerzas existentes en los anclajes, fueron las conseguidas mediante la teoría de la viga simplemente apoyada, en el caso del método tradicional y mediante el software tomando en cuenta elementos finitos y Bishop simplificado tanto para los casos de anclajes pasivos como activos, dichas fuerzas con expresadas para la separación establecida de 2m lo cual dio los siguientes resultados:

Tabla 14: Comparación de fuerzas en anclajes conseguidos por los diferentes métodos de diseño.

Anclaje	Fuerza Método Tradicional (kN)	Fuerza Sin elementos Finitos Pasivo (kN)	Fuerza Elementos Finitos Pasivo (kN)	Fuerza Elementos Finitos Activo (kN)
A	59,2	13,2	34,4	43,2
B	138,2	30,8	36	114,2
C	158,2	35	48,8	140,4
D	158,2	35,6	59,2	148,8
E	138,2	30,6	46,8	67,6
F	59,2	0	34,4	55

Se puede observar que las reacciones conseguidas para los anclajes mantienen semejanza entre el método tradicional y el caso activo conseguido mediante elementos finitos, por otro lado, los valores conseguidos mediante elementos finitos y Bishop para anclajes en caso pasivo mantienen cierta similitud.

### 3.5 Comparación económica

La comparación económica realizada por un metro cuadrado de muro encontró que los precios no presentaron mayor variación a excepción del anclaje en estado activo, debido a las pocas diferencias conseguidas entre longitudes y diámetros de anclajes, la diferencia entre precios conseguida para anclajes activos fue causa del pretensado necesario para los mismos, obteniendo los siguientes precios.

Tabla 15: Costos de construcción por metro cuadrado mediante diferentes métodos constructivos.

Método constructivo	Precio de metro cuadrado de construcción en dólares (\$)
Método tradicional	290
Método de modelación numérica caso pasivo	290
Método de modelación numérica caso activo	335

Cabe aclarar que dichos precios no presentan mayor cambio debido al uso de la constante 0,2 al momento del cálculo del esfuerzo actuante sobre la pantalla.

#### 4. Conclusiones

- El diseño de anclajes mediante las consideraciones del método tradicional puede ser tomadas en cuenta al momento de realizar un diseño mediante modelación numérica, adoptando las dimensiones conseguidas como un prediseño que puede ser ajustado para conseguir mayor eficiencia mediante modelación numérica con elementos finitos. Siempre y cuando el factor sea el adecuado.
- El método tradicional al ser un enfoque el cual idealiza el empuje presentado por el suelo, sobre todo en el caso expuesto en el presente documento se recomienda realizar más de un análisis, en los cuales se considere la geometría tomando en cuenta los diferentes empujes, para suelos con cohesión alta como recomendación se debe utilizar factores de 0,2, para cohesiones medias 0,3 y para suelos de cohesión baja de 0,4 , para conocer esto se debe analizar mediante modelación numérica para determinar las fuerzas de los anclajes para elegir el más óptimo.
- A pesar de que los anclajes diseñados mediante el método tradicional toman en cuenta el valor más bajo de la constante, estos aun cumplen con los requerimientos de carga, lo cual

demuestra que de haber utilizado factores más elevados hubiera existido un sobredimensionamiento.

- Analizando las fuerzas de los anclajes mediante el método de Bishop se encontró que el anclaje F funciona solamente para ciertos círculos de falla.
- Las reacciones en anclajes conseguidas mediante el método de Bishop asemejaron a las conseguidas mediante anclajes en estado pasivo analizados con modelación numérica, por otro lado, los anclajes diseñados mediante el método tradicional consiguieron reacciones similares a las obtenidas en anclajes activos mediante modelación numérica.
- El método tradicional de diseño de anclajes es un enfoque que principalmente se asemeja a los resultados mediante modelación numérica activos, analizando sus cargas en anclajes.
- El estado activo de los anclajes hace referencia a un enfoque constructivo el cual ayuda a la estabilidad del talud, esto gracias a su pretensado, lo cual evita grandes desplazamientos del suelo a anclar, a pesar de ser un método constructivo más costoso debido al pretensado.
- El uso de anclajes en estado activo es una opción bastante viable al momento de realizar un anclaje de un suelo con condiciones de baja resistencia como las tratadas en el presente documento cuidando que la longitud de anclaje no sea exagerada, debido a que esto ayudara con las deformaciones experimentadas por el muro y principalmente aumentara el factor de seguridad de la excavación.
- Los factores de seguridad obtenidos mediante los diferentes métodos expresan que para el caso de estudio fue necesario anclajes activos con un valor de pretensado del 80% de su fuerza para cumplir con el requerimiento establecido por la NEC.

## Referencias

- [1] G. R. S. SCHLÖR, REVISIÓN DE LOS CONCEPTOS DE SEGURIDAD ANTE DESLIZAMIENTO EN PLANO DE FALLA DE MUROS ANCLADOS, Santiago de Chile: Universidad Austral de Chile, 2006.
- [2] K. Takahashi, Modelos numéricos en el clima, Lima: Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima, 2019.
- [3] R. Á. Cabal, Introducción al método de elementos finitos, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid, 2022.
- [4] D. Klenn, Análisis numérico del comportamiento del anclaje durante el proceso constructivo de muros anclados en el conglomerado de Lima-Hotel Aeropuerto, Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2020.
- [5] D. E. B. Osorio, Inspección técnica de los cielos abiertos y construcción de anclajes pasivos y activos en el proyecto de Obras de acceso al túnel Guillermo Gavira Echeverri, Medellín: Universidad de Antioquia, 2023.
- [6] J. & Z. C. W. Argas Merino, La gestión del presupuesto por resultados y la calidad del gasto en gobiernos locales., Barranquilla: Escuela Naval de Suboficiales, 2020.
- [7] C. D. Vallejo López, Calidad de APUs en la Contratación Pública conforme a las especificaciones técnicas, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2022.
- [8] B. M. Das, Fundamentos de ingeniería de cimentaciones, 2012.
- [9] L. Báez and P. Echeverri, “Diseño de Estructuras de Contención Considerando Interacción Suelo-Estructura,” p. 134, 2015.
- [10] J. E. Bowles, “Foundation Analysis and Design,” pp. 404–414, 1997.
- [11] NEC 15, “Peligro sísmico,” 2015.
- [12] C. Vintimilla, “Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del sector las Orquideas de la ciudad de Cuenca, Ecuador,” p. 14, 2016.
- [13] B. M. Das, “Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones 7ma Edición,” p. 794, 2011.
- [14] I. Jurado, “Análisis mediante Elementos Finitos 3D de los efectos de las propiedades del Substrato Rocoso en la cimentación de turbinas eólicas.,” 2021.
- [15] B. M. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica 4ta Edición,” p. 636, 2013.
- [16] S. Molina and J. Pimentel, “Ajuste de los factores de corrección por forma en la ecuación de capacidad de carga última propuesta por Meyerhof, en losas de cimentación de geometría irregular, usando modelación numérica con MIDAS GTS NX,” 2021.
- [17] J. L. Devore, “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 8va edición,” p. 741, 2010.
- [18] A. Castro and J. Pérez, “Espectro de diseño y zonificación sísmica basada en periodos fundamentales de vibración de los suelos, en el área urbana de la ciudad de Mateare’.,” no. July, pp. 1–23, 2016.
- [19] K. Patiño, “Comparación entre el método de Mononobe-Okabe y un análisis dinámico tiempo-historia, para muros de contención tipo viga en voladizo, utilizando un registro sismográfico del sismo de Pedernales del 2016,” no. July, pp. 1–66, 2016.
- [20] R. N. Santana, “Presiones de tierra en muros rígidos sometidos a cargas sísmicas Director ;,” p. 87, 2017.

- [21] “Cursos de Geotecnia Online para profesionales | Escuela de Formación GF,” 04-Feb-2022. [Online]. Available: <https://escuela.geotecniafacil.com/>. [Accessed: 04-Feb-2022].
- [22] J. Arias Trujillo, “Presiones Dinámicas en Estructuras de Contención,” p. 319, 2015.
- [23] J. C. Yacchirema, “Construcción de un muro de contención en el sitio del deslizamiento de la plataforma de la vía Guaranda –Río Blanco entre el KM 0+910 – KM 0+958 de la provincia Bolívar Cantón Guaranda,” p. 143, 2013.
- [24] L. Báez and P. Echeverri, “Diseño de Estructuras de Contención Considerando Interacción Suelo-Estructura,” p. 134, 2015.
- [25] C. G. Ureta Chalén, “Aplicación de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15 para un suelo tipo F . Caso específico de cálculo de asentamientos utilizando el método de Asaoka,” p. 151, 2017.

