



**FACULTAD DE POSGRADO**

**COMPORTAMIENTO DE PANTALLA DE PILOTES DE  
CONCRETO PARA TUNELES VEHICULARES EN DISTINTOS  
TIPOS DE SUELOS EN TEGUCIGALPA**

**PRESENTADO POR:**

**JORGE GUILLERMO BUSTILLO BARAHONA**

**ROBERTO RIVERA CERRATO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS.**

**TEGUCIGALPA, HONDURAS C.A.**

**SEPTIEMBRE, 2018**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA  
UNITEC**

**FACULTAD DE POSTGRADO**  
**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**RECTOR**  
**MARLON ANTONIO BREVÉ REYES**

**SECRETARIO GENERAL**  
**RÓGER MARTÍNEZ MIRALDA**

**VICERRECTORA ACADÉMICA**  
**DESIREE TEJEDA CALVO**

**DECANA DE LA FACULTAD DE POSTGRADO**  
**CLAUDIA MARÍA CASTRO VALLE**

**COMPORTAMIENTO DE PANTALLA DE PILOTES DE  
CONCRETO PARA TUNELES VEHICULARES EN DISTINTOS  
TIPOS DE SUELOS EN TEGUCIGALPA**

**TRABAJO PRESENTADO EN CUMPLIMIENTO DE LOS  
REQUISITOS EXIGIDOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MÁSTER EN INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS**

**ASESOR METODOLÓGICO  
VIANNEY PATRICIA VILLALTA RIVERA**

**ASESOR TEMÁTICO  
DORIAN RAÚL ESPINOZA PALACIOS**

**MIEMBROS DE LA TERNA**



**FACULTAD DE POSTGRADO**  
**COMPORTAMIENTO DE PANTALLA DE PILOTES DE**  
**CONCRETO PARA TUNELES VEHICULARES EN DISTINTOS**  
**TIPOS DE SUELOS EN TEGUCIGALPA**

**MAESTRANTES:**  
**JORGE GUILLERMO BUSTILLO BARAHONA**  
**ROBERTO RIVERA CERRATO**

**Resumen**

Esta investigación desarrolló un análisis comparativo entre el método del equilibrio límite versus el método de elementos finitos aplicado a muros pantalla de pilotes, comparando estos análisis bajo distintos tipos de suelos comunes en la ciudad de Tegucigalpa, con el fin de identificar las diferencias, limitaciones y ventajas entre sí, proporcionando resultados para los momentos flectores máximo y esfuerzos cortantes de ambas metodologías. Se presentan cinco casos de estudio variando el tipo de suelo en cada análisis, arena arcillosa, arena limosa, arcilla ligera, toba y lutita, para los modelos matemáticos se definieron los parámetros geotécnicos y estructurales de los materiales utilizados. Y de esta manera determinar mediante los resultados obtenidos cuál de las dos metodologías presenta un diseño óptimo. Se evaluó la factibilidad económica del sistema, realizando un análisis de costos y de tiempo de ejecución entre una pantalla de pilotes y un muro de mampostería.

**Palabras Claves:** muros pantalla, pilote, método equilibrio límite, método de elementos finitos, momentos flectores.



## GRADUATE SCHOOL

# BEHAVIOR OF CONCRETE PILES IN VEHICULAR TUNNEL EXCAVATIONS UNDER DIFFERENT TYPES OF SOILS IN TEGUCIGALPA

**NAME OF THE MASTERS:  
JORGE GUILLERMO BUSTILLO BARAHONA  
ROBERTO RIVERA CERRATO**

### Abstract

This research developed a comparative analysis between the limit equilibrium method versus the finite element method applied to sheet pile walls, comparing these analyzes under different types of common soils in the city of Tegucigalpa, to identify the differences, limitations and advantages between them, providing results for the maximum bending moments and shear stresses of both methodologies. Five case studies are presented, varying the type of soil in each analysis, clayey sand, silty sand, light clay, tuff and shale, for the mathematical models the geotechnical and structural parameters of the materials used were defined. And in this way determine through the results obtained which of the two methodologies presents an optimal design. The economic feasibility of the system was evaluated, performing an analysis of costs and execution time between a pile screen and a masonry wall.

**Keywords:** sheet wall, Pile, Limit equilibrium method, Finite element method, bending moments.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico inicialmente a Dios, que siempre ha estado en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas sin desfallecer, seguidamente a mis padres, a mi hermana, por haberme brindado su amor y apoyo a largo de toda mi vida, a Alisson Barrientos por haber sido siempre mi apoyo incondicional. A mis hijos Jorge Andrés y Diego Ernesto, que tanto amo y que en ellos descansan mis fuerzas para seguir adelante y cumplir mis metas.

Jorge Guillermo Bustillo Barahona

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres, por ser un apoyo y motivación en mi vida. En especial a mi esposa Francés, mi apoyo incondicional en todo momento y a mi hija Arianna que está en camino, mi mayor inspiración.

Roberto Rivera Cerrato

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos expresar nuestro agradecimiento a:

A Dios Todopoderoso.

A nuestras familias por su apoyo y cariño.

A nuestro asesor temático y metodológico por sus consejos para el desarrollo de esta investigación.

A nuestros colegas y compañeros de trabajo que nos apoyaron en el desarrollo de esta investigación

Jorge Guillermo Bustillo Barahona

Roberto Rivera Cerrato

# ÍNDICE DE CONTENIDO

.....	xv
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN 1</b>	
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Antecedentes del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Definición del problema.....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Enunciado .....	3
1.3.2 Planteamiento del problema .....	4
1.3.3 Preguntas de investigación.....	4
<b>1.4 Objetivos .....</b>	<b>5</b>
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
<b>1.5 Justificación de la Investigación.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Análisis de la situación actual .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Teorías de Sustento .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Conceptualización .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4 Marco Legal.....</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	
<b>3.1 Método del Equilibrio Límite.....</b>	<b>32</b>
3.1.1. Tipo y nivel de investigación .....	32
3.1.2 Descripción del ámbito de la investigación .....	32
3.1.3 Población y Muestra.....	33
3.1.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....	33
3.1.5 Plan de recolección y procesamiento de datos .....	33
<b>3.2 Método de Elementos Finitos .....</b>	<b>34</b>
3.2.1.....	34
3.2.1 Descripción del ámbito de la investigación .....	34
3.2.2 Población y Muestra.....	34
3.2.3 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....	34
3.2.4 Plan de recolección y procesamiento de datos .....	35

<b>3. CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>36</b>
4.1 Resultados de encuesta.....	36
4.2 Resultados de entrevista .....	48
4.3 Descripción de los Análisis .....	51
4.4 Caso de Aplicación .....	51
4.5 Parámetros de Diseño .....	53
4.5 Programas de Cálculo Utilizados.....	54
4.6 Análisis Técnico.....	56
4.6 Análisis Comparativo en base a Costos.....	65
4.6 Análisis Comparativo en cuanto al Tiempo.....	70
4.....	71
<b>5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
5.1 Conclusiones .....	72
5.2 Recomendaciones .....	72
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>76</b>
Anexo 1. Instrumento de investigación: Encuesta.....	76
Anexo 2. Instrumento de investigación: Entrevista .....	79
Anexo 3. Resultados obtenidos del Programa GEO5.....	85
Anexo 4. Resultados obtenidos del Programa Plaxis 2D. ....	88
Anexo 5. Decreto 173-2010 Diario La Gaceta.....	98
Anexo 6. Especificaciones de Fichas del Fondo Hondureño de Inversión Social .....	99
Anexo 7. Visto bueno del asesor temático .....	109
.....	109
Anexo 8. Visto bueno del asesor metodológico .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso constructivo para excavación de pilotes.....	3
Figura 2. Clasificación de Pilotes.....	11
Figura 3. Esquema de pilotes secantes, tangentes y separados. ....	13
Figura 4. Proceso de ejecución de pilotes con perforación previa en suelos duros o roca. ....	14
Figura 5. Proceso de ejecución de pilotes mediante hélice continua. ....	15
Figura 6. Vista aérea túnel Bulevar Centroamérica. ....	17
Figura 7. Perforación de pilotes túnel Bulevar Centroamérica. ....	18
Figura 8, Cuñas de rotura en muro pantalla. ....	19
Figura 9. Influencia de los movimientos sobre los empujes del terreno. ....	19
Figura 10. Distribución de empuje a) Pasivo, b) Activo. ....	22
Figura 11. Convención de signos. ....	24
Figura 12. Diagrama de Fuerzas Sísmicas para la Evaluación de la Estabilidad Externa de pantalla en voladizo sin Gravedad. ....	26
Figura 13. Esquema proceso de discretización. ....	27
Figura 14. . Mallado típico para el análisis de un corte vertical por elementos finitos.....	28
Figura 15. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 2 de la encuesta. ....	38
Figura 16. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 3 de la encuesta. ....	39
Figura 17. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 4 de la encuesta. ....	40
Figura 18. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 5 de la encuesta. ....	41
Figura 19. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 7 de la encuesta. ....	42
Figura 20. Porcentaje de parámetros para la configuración de pilotes.....	44
Figura 21. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 10 de la encuesta. ....	46
Figura 22. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 12 de la encuesta. ....	47
Figura 23. Experiencia profesional de los entrevistados.....	48
Figura 24. Parámetros de diseño según entrevistados.....	49
Figura 25. Respuestas más comunes de la pregunta seis. ....	50
Figura 26. Esquema geométrico de muro pantalla de pilotes. ....	52
Figura 27. Modelo realizado en el programa GEO5. ....	55
Figura 28. Modelo realizado en el programa PLAXIS 2D. ....	55

Figura 29. Gráfico de profundidad de pilotes según el tipo de suelo.....	56
Figura 30. Gráfico de momentos flectores y esfuerzo cortante según el tipo de suelo. ....	58
Figura 31. Gráfico de momentos flectores y esfuerzo cortante según el tipo de suelo. ....	59
Figura 32. Comportamiento de muros pantallas de pilotes. ....	60
Figura 33. Cronograma de Ejecución de obra. ....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 1 de la encuesta. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 2. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 2 de la encuesta. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 3. Porcentaje de áreas de trabajo por rubro.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 4. Porcentaje de recomendación para estabilidad de túneles.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 5. Porcentaje de parámetros para la configuración de pilotes.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 6. . Procesos constructivos y métodos observados. ....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 7. Parámetros geotécnicos de diseño.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 8. Ficha de costo para muro de mampostería.....</b>	<b>67</b>
<b>Tabla 9. Ficha de costo muro de concreto reforzado.....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 10. Ficha de excavacion estructural.....</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 11. Ficha de pilote de concreto.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabla 12. Ficha de Comparativa de valor.....</b>	<b>70</b>

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Carga lateral .....	19
Ecuación 2. Factor de seguridad. ....	20
Ecuación 3. Empuje pasivo. ....	21
Ecuación 4. Empuje activo.....	21
Ecuación 5. Cálculo de coeficiente de presión activa de tierra .....	23
Ecuación 6. Cálculo de coeficiente de presión pasiva de tierra .....	23
Ecuación 7. Cálculo de ángulo sísmico de inercia .....	24
Ecuación 8. Incremento de la presión activa de la tierra bajo efectos sísmicos.....	25
Ecuación 9. Reducción de la presión pasiva de la tierra bajo cargas sísmicos. ....	25

# CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 Introducción

Actualmente en Tegucigalpa, el tráfico vehicular se encuentra en aumento, la Alcaldía Municipal del Distrito Central, ha desarrollado proyectos viales en la capital, con el fin de mejorar el flujo vehicular reduciendo el tráfico, por medio de la construcción de pasos aéreos, pasos subterráneos, puentes y túneles peatonales, algunos de los proyectos mencionados han utilizados diferentes sistemas de retención en Tegucigalpa, los denominados muros pantalla de pilotes, consisten en una batería de pilotes, tangentes o espaciados a una “x” distancia, los cuales funcionan como una pantalla de retención, fijados en la parte superior por una viga cabecera, trabajando estructuralmente como una viga en voladizo. Esta metodología requiere de maquinaria y personal especializado para la ejecución de los pilotes, por lo que no son muchas las empresas en el país que tienen acceso a esta metodología, lo que conlleva al poco conocimiento que existe en el diseño de pantallas de pilotes y el comportamiento de estas, ante distintas características del entorno.

La normativa local, el Código Hondureño de la Construcción, legalizado mediante el decreto 173-2010, no especifica a detalle estos tipos de sistemas, solamente especifica en el capítulo 6, sobre cimentaciones y muros de retención, en la sección 6.7 habla sobre el diseño de pilotes.

En esta investigación se verificó las metodologías de diseño de pilotes, comparando el método del equilibrio límite versus el método de elementos finitos, se realizó cinco casos de estudio, en los cuales se modificó el tipo de suelo en cada análisis, con el fin de obtener un diseño óptimo y seguro a nivel geotécnico y estructural, se realizó el análisis de costos de un sistema de

retención de un muro de mampostería y de una pantalla de pilotes, también se compararon los tiempos de ejecución entre un sistema de retención y otro.

## 1.2 Antecedentes del problema

Los pilotes son elementos estructurales que pueden ser construidos de concreto, madera o acero, son muy utilizados como sistemas de cimentaciones profundas, que transmiten las cargas de la superestructura al suelo. Las cimentaciones con pilotes generalmente son utilizadas cuando los estratos superficiales son demasiado débiles para soportar las cargas de la estructura y se necesita profundizar hasta encontrar la roca de basamento o un estrato de suelo más competente. Sin embargo, los pilotes no únicamente pueden estar sometido bajo cargas axiales, existen muchas cimentaciones profundas que deben soportar cargas laterales, de los cuales se menciona los siguientes casos:

- Presión de suelo en muros de retención
- Cargas de viento
- Cargas de sismo
- Cargas de atraque de barcos que entran en contacto con los muelles
- Movimiento de laderas
- Cargas verticales excéntricas en columnas
- Cargas estructurales sobre pilares de arco o puentes colgantes

El estudio del comportamiento de las pantallas de pilotes conlleva muchas variables a analizar cómo ser el tipo de suelo, las cargas a las cuales está sometido, el tipo de pilote y geometría.

Braja Das, (2012) menciona:

Se han conducido numerosas investigaciones, tanto teóricas como experimentales, para predecir el comportamiento y la capacidad de soporte de carga de los pilotes en suelos granulares y cohesivos, los mecanismos aún no se comprenden por completo y quizá nunca lo sean. Así pues, el diseño y análisis de cimentaciones con pilotes se puede considerar un arte como resultado de las incertidumbres implicadas al lidiar con algunas de las condiciones del subsuelo. (P.536)

Actualmente en nuestro país las pantallas de pilotes como sistemas de retención están siendo muy utilizados en los proyectos viales, por ejemplo, en Tegucigalpa se han hecho alrededor de 6 proyectos de túneles vehiculares en los cuales se han utilizados estos sistemas para retener la masa de suelo y permitir excavaciones profundas. En la siguiente figura se observa algunos de los proyectos en su etapa de ejecución.



**Figura 1. Proceso constructivo para excavación de pilotes.**

**Fuente: Geotécnica Solutions.**

### **1.3 Definición del problema**

#### **1.3.1 Enunciado**

Como se mencionó anteriormente, en Tegucigalpa las pantallas de pilotes están siendo muy utilizados en el sector construcción como sistemas de retención para la ejecución de túneles vehiculares, por su facilidad y rapidez en la ejecución. La literatura indica que existe mucha

incertidumbre en el proceso de análisis y diseño de estos elementos estructurales, debido a las muchas variables que existen, que influyen para la solución de un diseño óptimo, seguro y económicamente factible. Adicionalmente nuestro país no posee lineamientos técnicos para el diseño y ejecución de estos sistemas, que incluyan aspectos geotécnicos y estructurales para sus comportamientos, como los tienen otros países más desarrollados.

### **1.3.2 Planteamiento del problema**

Los profesionales del diseño estructural en Honduras se rigen por el Código Hondureño de Construcción, el cual brinda lineamientos de análisis y diseño para concreto y acero estructural, sin embargo, para sistemas de cimentaciones profundas o para el caso particular de sistemas de retención por medio de pantalla de pilotes, este código, no profundiza en su comportamiento ante distintos tipos de suelo, de igual manera tampoco profundiza para las consideraciones de la interacción suelo - estructura. Por lo que cada diseñador se ve en la tarea de utilizar lineamientos de normas internacionales para la ejecución de sus proyectos. Por tal razón se desea investigar el comportamiento de estos sistemas, utilizando parámetros geotécnicos de distintas zonas de Tegucigalpa y posteriormente analizarlos bajo distintas variables de diseño, considerando aspectos geotécnicos y estructurales, los cuales deben evaluarse concurrentemente.

### **1.3.3 Preguntas de investigación**

1. ¿Qué tipo de suelo presenta un mejor comportamiento los muro pantalla de pilotes en Tegucigalpa?
2. ¿Cuáles son los tipos de pilotes que existen y cuáles son los procesos constructivos más utilizados en Tegucigalpa?
3. ¿Cuáles son los costos de los sistemas de retención por medio de pantalla de pilotes en comparación con otros sistemas?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar el comportamiento de muros pantalla de pilotes en cortes para túneles vehiculares, considerando 5 tipos de suelos comunes en Tegucigalpa para determinar con cuál presenta un mejor desempeño, evaluando costos y sistemas constructivos.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar con qué tipo de suelo presenta un mejor comportamiento los muro pantalla de pilotes en Tegucigalpa.
2. Definir las tipologías de pilotes que existen y los procesos constructivos más utilizados en Tegucigalpa.
3. Determinar los costos de los sistemas de retención por medio de pantallas de pilotes en comparación con otros sistemas.

## **1.5 Justificación de la Investigación**

En Honduras las obras de infraestructura están en crecimiento y cada vez se enfrentan a retos ingenieriles más complicados como lo son, edificios de mediana y gran altura, pasos a desnivel, pasos aéreos, pasos subterráneos, estabilización de laderas, etc.

Estos grandes proyectos, cimentados en una gran variedad de suelos en Tegucigalpa, está variación geológica, cambia según su ubicación, presentando topografías regulares e irregulares, variando sus capacidades de soporte; es por ello, que algunas empresas diseñadores y constructoras nacionales se han especializado y se han capacitado para innovar agregando tecnologías de cimentación y retención en sus proyectos.

Al mismo tiempo los entes gubernamentales como la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO), la Secretaría de Infraestructura y Servicios Públicos (INSEP), el Fondo Hondureño de Inversión Social (FHIS), el Instituto de Desarrollo Comunitario, Agua y Saneamiento (IDECOAS), y las alcaldías municipales, deberían ir de la mano especializándose y capacitándose para supervisar obras públicas de infraestructura para que estas sean de calidad y seguras, con un nivel alto de ingeniería.

Debido a lo anterior, esta investigación quiere realizar un aporte específico para mostrar el comportamiento de pantallas de pilotes en cortes para túneles vehiculares para distintos parámetros geotécnicos, tomados de una base de estudios de suelos realizados a nivel nacional.

El Código Hondureño de Construcción 2008, en su capítulo 6, en sus secciones 6.7 Pilotes - Requisitos Generales y 6.8 Pilotes - Requisitos específicos, menciona de manera muy breve estos sistemas quedando esta investigación al público, para que empresas privadas, entes gubernamentales y profesionales del medio de la construcción tengan acceso gratuito al tema siendo este, más amplio de lo que presenta la norma de construcción local.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

En la actualidad, la normativa del Código Hondureña de Construcción, especifica los requisitos para el diseño de pilotes, siendo este un aporte valioso y fundamental para los profesionales que se dedican a este rubro, sin embargo, esta investigación presentara criterios más específicos, apoyándose de diferentes textos de autores que tienen ponderaciones válidas para el diseño que cumplan con la seguridad e integridad estructural de las pantallas de pilotes en cortes para distintos tipos de suelos. Este capítulo contiene el fundamento teórico utilizado para desarrollar esta investigación.

### **2.1 Análisis de la situación actual**

Actualmente cuando se habla de cimentaciones y sistemas de retención, se encuentra una variedad que cambian entre su tipo y su uso, en esta investigación se hablara directamente de pilotes usados en grupo, en forma de pantalla, utilizados como sistema de retención para cortes de terrenos en túneles y pasos vehiculares, al definir que son y cómo funcionan los pilotes.

Cuando uno o más estratos de suelo son ligeramente compresibles y demasiado débiles para soportar la carga transmitida (...), los pilotes se utilizan para transmitir la carga al lecho de roca subyacente o a un estrato de suelo más fuerte. Cuando no se encuentra un lecho de roca a una profundidad razonable debajo de la superficie del terreno, los pilotes se emplean para transmitir la carga estructural de manera gradual al suelo. La resistencia a la carga estructural aplicada se deriva principalmente de la resistencia por fricción desarrollada en la interfaz suelo-pilote. (Vesic, 1977).

Los pilotes son elementos estructurales que están hechos de acero, concreto o madera. Se utilizan para construir cimentaciones con pilotes, que son profundas y cuestan más que las cimentaciones superficiales. A pesar de su costo, el uso de pilotes con frecuencia es necesario para asegurar la seguridad estructural. (Braja Das, 2010).

Los pilotes no son de uso reciente, tal como lo expone el Dr. Michael Tomlinson

Los pilotes son los primeros ejemplos de arte y ciencia de la ingeniería civil. En Gran Bretaña hay numerosos ejemplos de apilamiento de madera en obras de puentes y asentamientos ribereños construidos por los Romanos, en tiempos medievales, pilotes de roble y aliso se utilizaron en los cimientos de los grandes monasterios construidos en las tierras bajas de East Angla. En China, los constructores de puentes en la dinastía Han (200 aC a 200 dC) utilizaron tablaestaca. (Tomlinson M., 2008).

En el pasado, la madera, fue el material por excelencia a utilizar por su facilidad constructiva, hoy en día, sucede lo contrario, por ejemplo, los pilotes de madera son limitados por la circunferencia natural de la madera y la capacidad del material para resistir las exigencias de carga. La ingeniería fue realizando investigaciones sobre la resistencia de materiales, ocasionando que la madera dejara de ser un material primario para pasar a ser un material suplementario en el medio de la construcción.

Los pilotes de madera fueron remplazados por concreto y acero solo porque estos materiales más nuevos podían ser fabricados en unidades que fueran capaces de soportar fuerzas comprensivas, de flexión y tracción mucho más allá de la capacidad de un pilote de madera y de dimensiones similares. (Tomlinson M., 2008)

Los materiales de los pilotes se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) Madera.
- b) Concreto.
- c) Acero.
- d) Compuestos: cuando se mezcla el Acero con el Concreto.

Las condiciones de suelo no siempre son las más apropiadas para realizar el diseño de una cimentación, se ha vuelto uno de los factores más fundamentales en la ingeniería ya que todas las estructuras descargan sus cargas en el suelo. Para el diseño de cimentaciones se debe tener las

consideraciones de parámetros geotécnicos, es obligatorio conocer detalladamente el comportamiento del suelo al fin de escoger los parámetros correctos de cada suelo.

Los suelos tienen muchas clasificaciones según granulometría, relación peso-volumen, densidad relativa y presentan muchísimas más variables a ser elementos compuestos heterogéneamente.

Se puede nombrar una breve clasificación de suelos más comunes:

- a) Arcilla.
- b) Arena.
- c) Limo.
- d) Roca.

Se ha mencionado brevemente el origen, función de los pilotes y los materiales, en base a esto se puede realizar una clasificación de los pilotes.

“En general los pilotes son elementos que se utilizan para transmitir las cargas de una estructura a estratos profundos más resistentes que los mantos superficiales, o bien cuando la estructura deba construirse atendiendo a diferentes causas:” (Villalaz C., P. 461).

Clasificación de los pilotes:

- a) Respecto a los materiales empleados en su elaboración.
- b) Respecto al lugar de construcción.
- c) Respecto a la sección transversal.
- d) Respecto a su apoyo.
- e) Respecto a su dirección.

El Consulting Curtins, clasifica los pilotes según material, método de colocación, basándose en el código practico de cimentaciones de 1986.

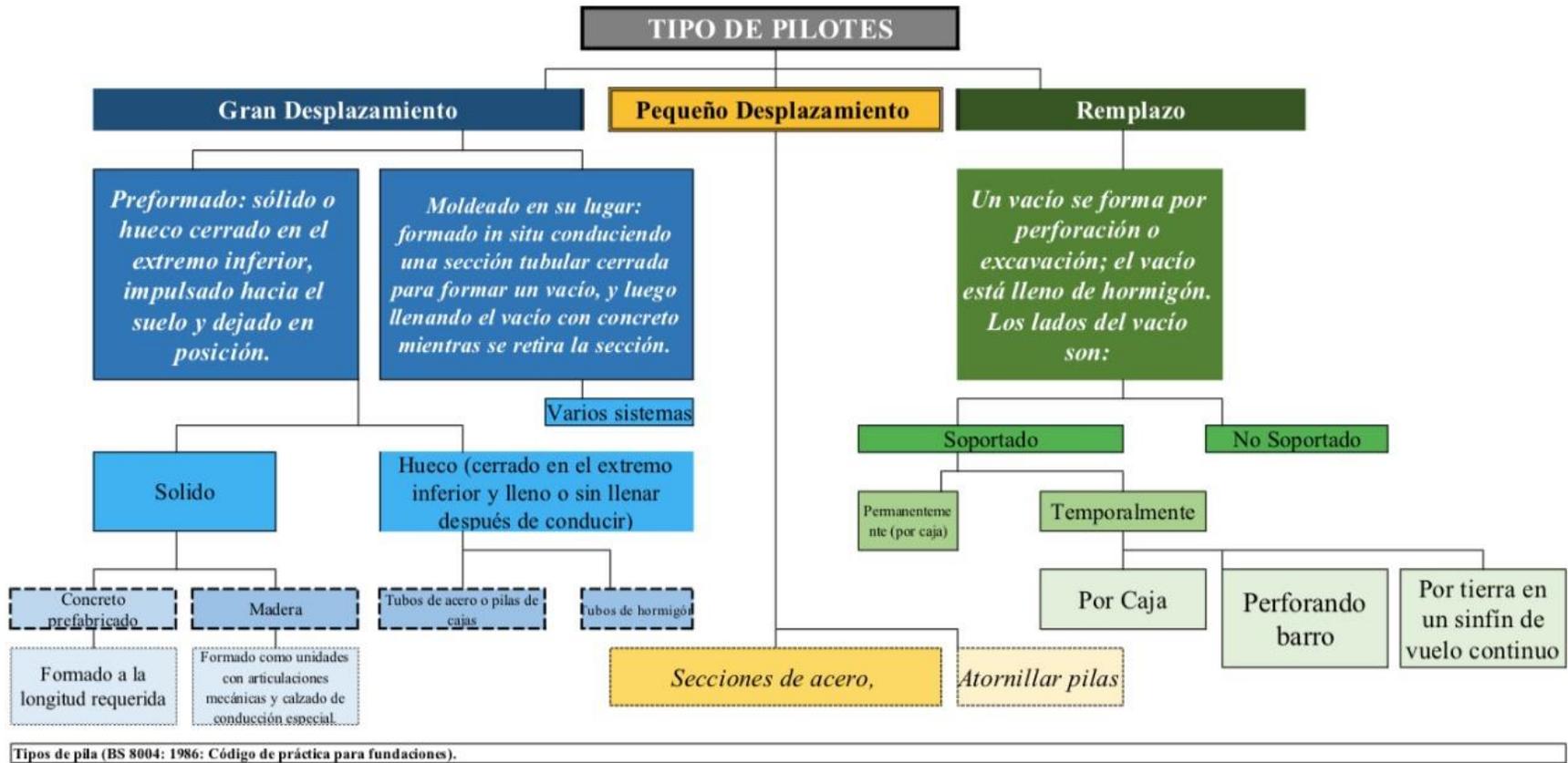


Figura 2. Clasificación de Pilotes.

Las normas internacionales de diseño desarrollan especificaciones técnicas de los pilotes como elementos estructurales, las cuales podemos mencionar: El Instituto Americano del Concreto (ACI), especifica en el capítulo 13, cimentaciones profundas, el Euro código (EN) dividido en diez (10) secciones numeradas del cero (0) al nueve (9), donde desarrolla el tema de cimentaciones en las secciones uno (1), dos (2), cuatro (4) y siete (7), el EN es utilizado en los países miembros de la Unión Europea, en Latinoamérica destacan las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC), en el caso de Perú tienen el reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), en caso de Chile enmarca todas sus normas en un listado único como Norma Chilena, todas estas normativas han realizado investigaciones basadas en métodos de diseño y laboratorio, para verificar en campo los estudios realizados, definiendo los límites de diseño, las resistencias últimas requeridas, límites de esfuerzos, etc.

El ACI R13.2.6.1 menciona que la capacidad admisible del suelo o la capacidad admisible de los pilotes deben determinarse mediante los principios de mecánica de suelos y de acuerdo con el reglamento general de construcción. El tamaño del área de la base (...) de los pilotes generalmente se establece con base en estos valores admisibles para cargas no mayoradas (de servicio) tales como Muerta, Viva, Viento y Sismo. (ACI 318, 2014)

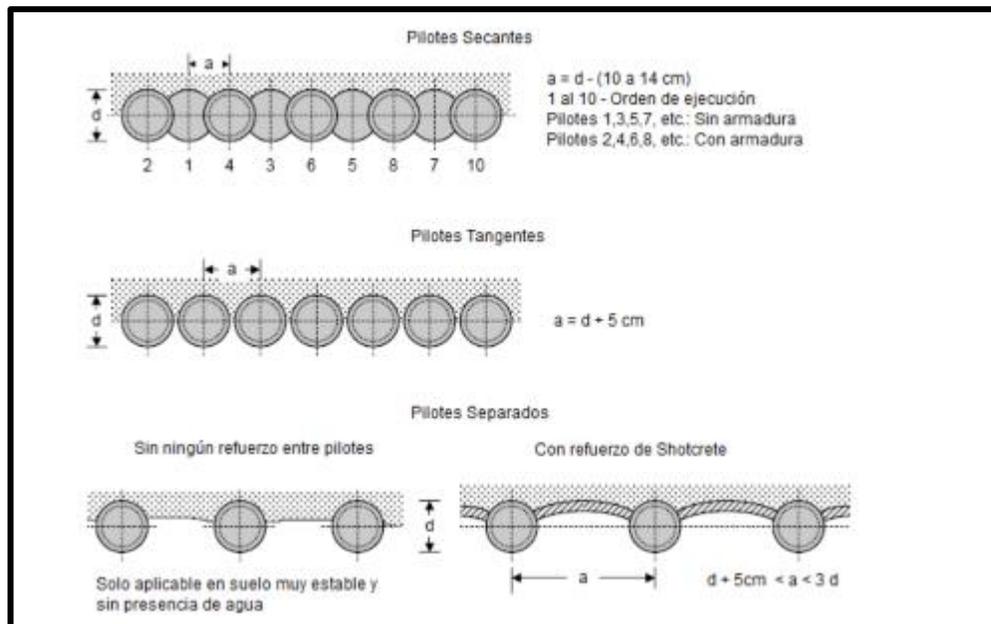
El Euro código 7 menciona El tema de las cimentaciones por pilotes se aborda, de manera muy amplia, en el Capítulo 7 del EC-7 que comienza con la definición de los estados límite a considerar y con los métodos y consideraciones de diseño, haciendo especial hincapié en las pruebas de carga en pilote. Se distingue entre pilotes cargados axialmente, tanto a compresión como a tracción y pilotes sometidos a carga lateral (Euro código 7, 2010)

El proceso constructivo de un pilote dependerá de su tipología, variando en la maquinaria a utilizarse, como lo especifica la empresa Terra Foundation, especialistas en cimentaciones, con

una división especializada en pilotes llamada Pilotes Terratest, establecidos en América del Sur, en los países de Perú, Bolivia y Chile,

Indica que inicialmente se determina el tipo de pilote a utilizar, para después posteriormente determinar el tipo de excavación a realizar y hacer la ejecución del pilote, Terratest menciona

Los muros de pilotes de concreto armado se ejecutan con una perforación previa en una gama de diámetros que van desde 0.60 a 1.50 m, y los mismos pueden ser secantes (sobrepuestos), tangentes o tener una separación entre ellos dependiendo del tipo de suelo y de la presencia de agua; alcanzando profundidades superiores a los 50.00 m, incluso en terrenos muy accidentados y difíciles por la presencia de bloques, bolones, roca, (Saucedo M., 2010, p. 2)



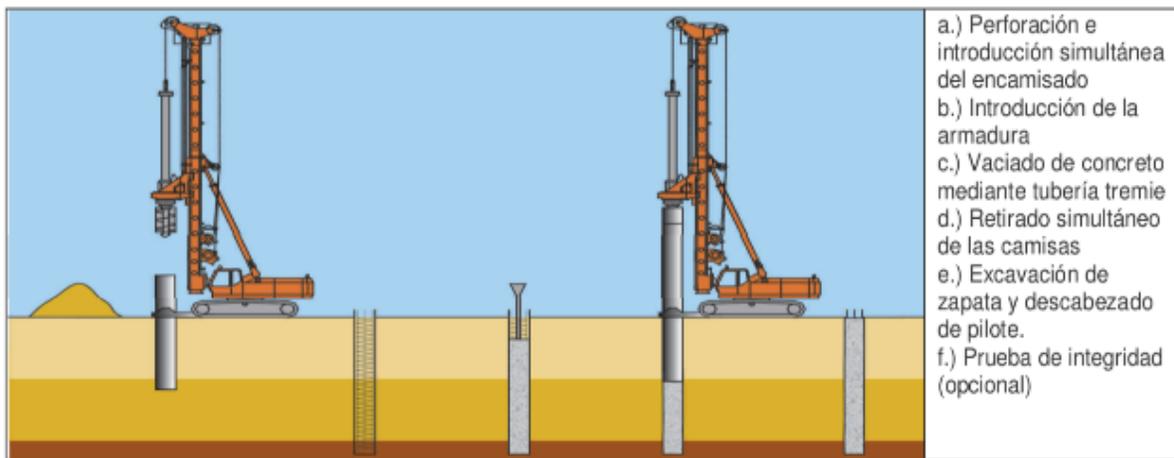
**Figura 3. Esquema de pilotes secantes, tangentes y separados.**

**Fuente: Saucedo Sulzer.**

Para la elección del tipo de pilote dependerá del tipo de suelo existente, de los empujes del suelo, si es posible realizar una excavación seca, del espacio para la instalación de la maquinaria y presencia de agua en los estratos inferiores.

Tanto las dimensiones de los pilotes (diámetro y largo) como su separación quedarán determinadas por el análisis estático del muro y por la disponibilidad de la maquinaria requerida para la construcción. Dado que un muro de pilotes no puede ser recuperado una vez finalizada la excavación, puede optarse por utilizarlo como parte de la futura construcción. En este caso deberán tomarse en cuenta estados de carga adicionales para el dimensionamiento final del muro. (Saucedo M., 2010, p. 2)

La excavación para el pilote se realiza por medio de máquinas especializadas perforadoras rotativas hidráulicas equipadas por barras para suelos duros o rocas, su trabajo es similar al de un taladro que utiliza brocas con diámetros específicos que dependerán del diámetro del pilote, a la excavación se procede a realizar el anclaje del acero de refuerzo que este diseñado según tipo de pilote, procediendo al vaciado del concreto mediante tubería como lo muestra la figura.

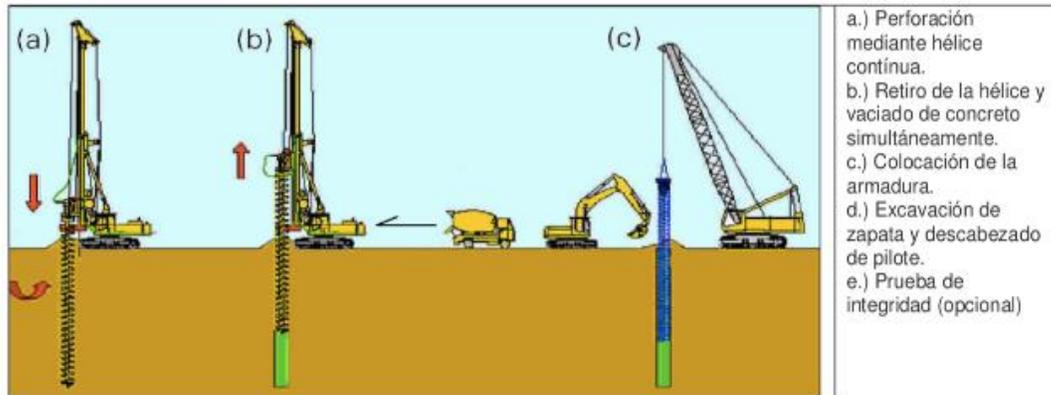


**Figura 4. Proceso de ejecución de pilotes con perforación previa en suelos duros o roca.**

**Fuente: Saucedo Sulzer.**

Otras maquinarias utilizadas son las perforadoras de hélice continua para suelos blandos, que generan grandes rendimientos de trabajo, funciona igual al de la perforadora rotativa

hidráulica, extraer el suelo, en este caso se repite el izado del acero de refuerzo y el volcado del concreto como se muestra en la figura a continuación.



**Figura 5. Proceso de ejecución de pilotes mediante hélice continua.**

**Fuente: Saucedo Sulzer**

Actualmente los principales desarrolladores e investigadores para el diseño de los pilotes pertenecen a La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO), del Instituto Americano del Concreto (ACI), en nuestro país, para el diseño de pilotes nos regimos del Código Hondureño de Construcción 2008, nuestra norma establece que las estructuras deben ser diseñadas para resistir cargas gravitacionales, ocupacionales y laterales otras de carácter dinámico como las de viento y sismo.

Los Edificios y otras estructuras, y todas sus partes, deberán diseñarse y construirse para sostener, dentro de las limitaciones especiales en este código, todas las cargas muertas y todas las otras cargas especificadas dentro de estas normas, en todas partes de este código. Las cargas de impacto deberán considerarse en el diseño de cualquier estructura donde ocurren cargas de impacto. (Código Hondureño de la Construcción, 2008).

A partir del año 2014, con la llegada de un nuevo alcalde en la capital, se han desarrollado proyectos viales, de los cuales han ejecutados pilotes de concreto en túneles, estabilizando los

cortes de terreno mediante esta técnica, implementado nuevas maquinarias en el país, como perforadora rotativa hidráulicas con brocas que van en relación con el diámetro requerido de los pilotes.

Se destaca los siguientes proyectos ejecutados en Tegucigalpa, en los cuales se han utilizado muros pantalla de pilotes como elemento de estabilización.

- a) Túnel Bulevar Juan Pablo II.
- b) Túnel Bulevar Centroamérica
- c) Túnel Bulevar Kennedy.
- d) Túnel Jacaleapa.
- e) Túnel Lomas Sur.
- f) Túnel San Miguel.



Túnel Boulevard Centroamérica en proceso de construcción.



Túnel Boulevard Centroamérica finalizado.

**Figura 6. Vista aérea túnel Boulevard Centroamérica.**

**Fuente: Google Earth**



**Figura 7. Perforación de pilotes túnel Bulevar Centroamérica.**

**Fuente: Geotécnica Solutions**

## **2.2 Teorías de Sustento**

En este apartado se describirán las teorías en las cuales se fundamenta esta investigación, y se mostrará las bases de diseño para el desarrollo de los muros pantalla de pilotes.

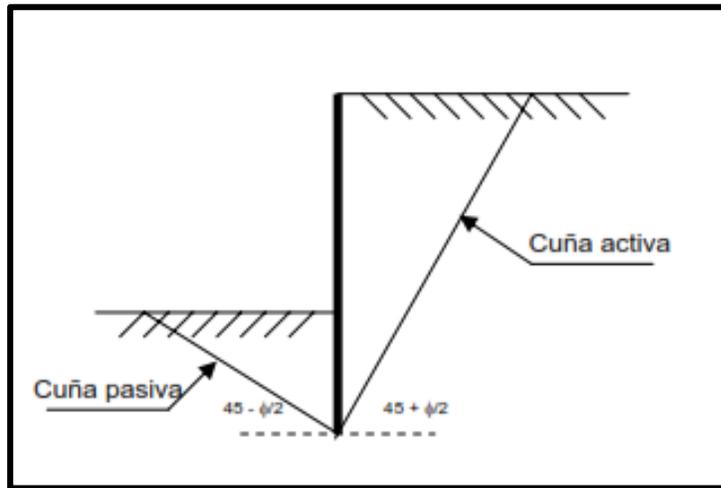
### **2.2.1 Análisis de las metodologías**

#### **2.2.1.1. Equilibrio Límite**

Este método se fundamenta en las teorías del equilibrio límite, el cual especifica que el material alcanza el equilibrio a lo largo de las líneas de deslizamiento, las cuales limitan la cuña de rotura sobre la que se produce el movimiento de la masa

Estos métodos consideran que los desplazamientos de la pantalla han sido suficientemente grandes como para que se alcancen los estados límites activo y pasivo del terreno, correspondientes a la excavación y a la respuesta de suelo frente a los movimientos de la pantalla hacia el terreno, los cuales representan los dos extremos del estado tensional la que se ve sujeto el suelo en contacto con el muro. Esta relación entre tensiones horizontales y movimientos que experimenta la pantalla se puede observar en la figura 3. Finalmente, para quedarse del lado de la seguridad, se introducen márgenes adecuados a los parámetros del

terreno y se incrementa la longitud de empotramiento de la pantalla obtenida en el cálculo. (Sanhueza Plaza, 2008, p. 56)



**Figura 8, Cuñas de rotura en muro pantalla.**

**Fuente: Sanhueza Plaza.**

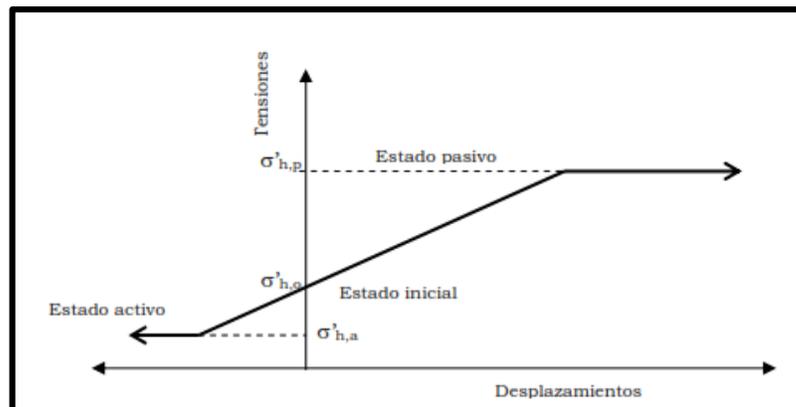
$$P = P_0 + K_H \cdot (\delta_H + v)$$

**Ecuación 1. Carga lateral**

Fuente: Sanhueza Plaza, 2008, p. 56

Donde:

- $P_0$ : Tensión en estado en reposo a una profundidad  $z$
- $K_H$ : Constante de balasto horizontal de terreno
- $\delta_H$ : Desplazamiento horizontal a la profundidad  $z$
- $v$ : Factor de histéresis



**Figura 9. Influencia de los movimientos sobre los empujes del terreno.**

**Fuente: Sanhueza Plaza.**

Un buen análisis debería representar adecuadamente el mecanismo de falla de un talud. Estos análisis son generalmente simples en concepto. En general se consideran únicamente las condiciones requeridas para la estabilidad, o para ser más precisos, para el equilibrio límite. El término equilibrio límite se aplica a sistemas de fuerza que están justo en el punto de falla. El sistema de equilibrio límite considera que en el caso de una falla las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en rebanadas y estableciendo el equilibrio global y el de cada una de ellas. (Martínez, 2016, p. 20)

El factor de seguridad es la relación entre las condiciones reales que presenta el corte, y las condiciones que llevan a su rotura, la expresión viene dada por:

$$FS = \frac{\int \tau_R . ds}{\int \tau . ds}$$

### **Ecuación 2. Factor de seguridad.**

Fuente: Martínez, 2016.

Donde:

$\tau_R$ : Resistencia al corte máximo que se puede movilizar a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento

$\tau$ : Resistencia al corte movilizado a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento

$ds$ : diferencial de longitud de la superficie de deslizamiento

Para la aplicación de estos métodos se requieren las siguientes etapas de cálculo.

1. Se examina un mecanismo de rotura cinemática mente admisible.
2. A partir de la condición de equilibrio, se establecen relaciones entre las fuerzas presentes en el problema. Diferenciando entre las fuerzas que inducen al desequilibrio (peso, cargas externas...), y las fuerzas internas resistentes. Las ecuaciones necesarias que se deben cumplir en el problema son:
  - Equilibrio de fuerzas, tanto verticales como horizontales
  - Equilibrio de momentos, respecto a un punto arbitrario
  - Se analiza la estabilidad del conjunto a partir del concepto de factor de seguridad.
3. Mediante cálculos repetitivos se halla el menor valor del factor de seguridad, que va asociado a la superficie de deslizamiento más desfavorable. (Martínez, 2016, p. 21)

### 2.2.1.2. Empuje Pasivo de Rankine

Rojo Pizarro, (2016) Afirma “Se entiende como la presión del suelo cuando existe un desplazamiento de la estructura hacia el suelo. En este caso se tiene un equilibrio plástico presentado al momento en que la masa de suelo fallará por corte” (p. 7).

La presión general del empuje pasivo, considerando suelo cohesivo con fricción es:

$$\sigma_p' = \sigma_v' \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) = \sigma_v' K_p + 2c' \sqrt{K_p}$$

#### *Ecuación 3. Empuje pasivo.*

Fuente: Rojo Pizarro, 2016.

Donde:

$C'$ : Cohesión (ton/m<sup>2</sup>)

$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right)$  Coeficiente de empuje pasivo

$\sigma_v'$ ; Esfuerzo vertical efectivo (ton/m<sup>2</sup>)

### 2.2.1.3. Empuje Activo de Rankine

Rojo Pizarro, (2016), Afirma: “Se entiende como la presión que ejerce este cuando existe una deformación del suelo hacia la estructura, en este caso se tiene un equilibrio plástico presentado al momento en que la masa de suelo fallará por corte” (p. 8).

La expresión general del empuje activo, considerando suelo cohesivo con fricción es:

$$\sigma_a' = \sigma_v' \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right) = \sigma_v' K_a + 2c' \sqrt{K_a}$$

#### **Ecuación 4. Empuje activo.**

Fuente: Rojo Pizarro, 2016.

Donde se define  $K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right)$

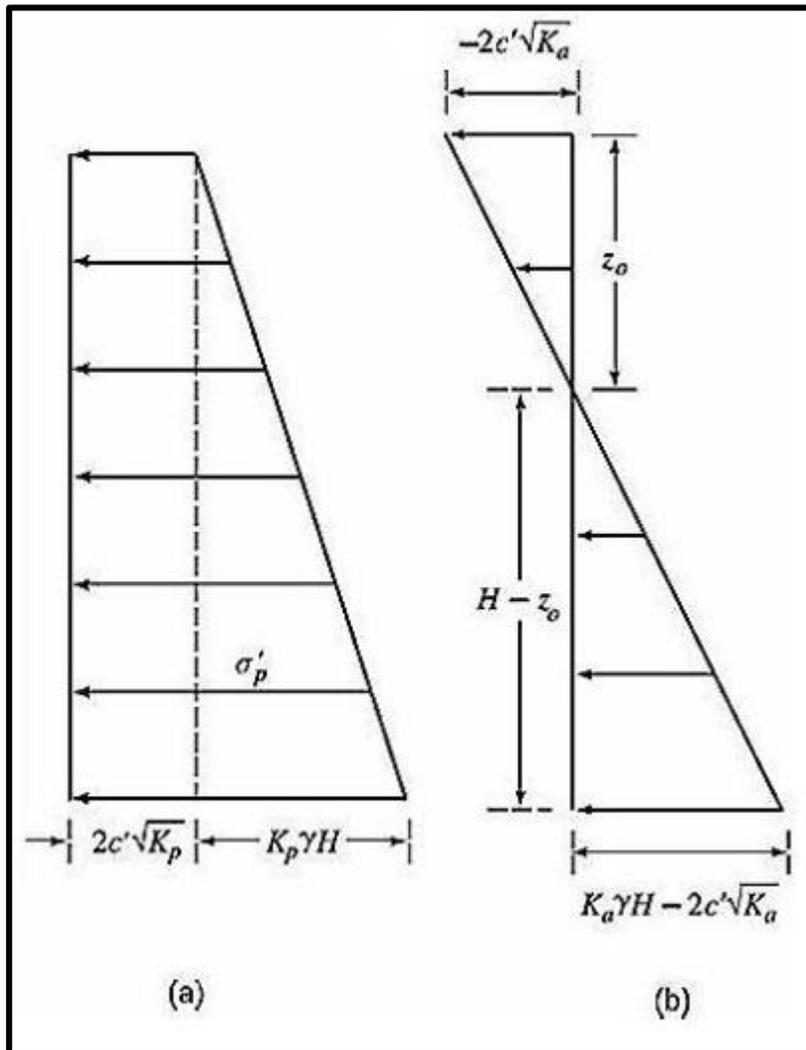


Figura 10. Distribución de empuje a) Pasivo, b) Activo.

Fuente: Rojo Pizarro.

#### 2.2.1.4. Influencia de sismos en la presión de tierra

El sismo aumenta el efecto de la presión activa y reduce el efecto de la presión pasiva. La teoría de Mononobe-Okabe, se deriva de asumir suelos granulares sin influencia del agua. Por lo tanto, todos los ingresos de suelo se asumen granulares cuando se emplea estas teorías para hacer frente a los efectos del sismo.

El coeficiente  $k_h$  es asumido siempre positivamente, de tal forma que el efecto es siempre desfavorable. El coeficiente  $k_v$  podría recibir ambos valores negativo y positivo. Si el equivalente a la aceleración  $a_v$  actúa hacia abajo (desde la superficie terrestre) la fuerza de inercia  $k_v \cdot W_s$  se ejerce desde la cuña en tierra, en la dirección opuesta (hasta el levantamiento de la cuña). El valor de la aceleración equivalente  $a_v$  (y así también el coeficiente  $k_v$ ) y la fuerza de inercia  $k_v \cdot W_s$  son asumidas como positivas. Es claramente evidente que la fuerza de inercia actúa en dirección opuesta a la aceleración (si la aceleración es asumida como hacia arriba  $-a_v = -k_v \cdot g$  entonces la fuerza de inercia presiona la cuña en tierra hacia abajo:  $-k_v \cdot W_s$ ).

La dirección con mayor cantidad de efectos desfavorables es asumida cuando examinamos los efectos sísmicos. (Mononobe N, 1929, p.12)

Mononobe - Okabe

El coeficiente  $K_{ae}$  para la presión activa de la tierra está dado por:

$$K_{as} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi - \alpha)}{\cos \psi \cos^2 \alpha \cos(\psi + \alpha + \delta) \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \psi - \beta)}{\cos(\delta + \psi + \alpha) \cos(-\beta + \alpha)}} \right)^2}$$

**Ecuación 5. Cálculo de coeficiente de presión activa de tierra**

Fuente: Mononobe N, Matsuo H, 1929

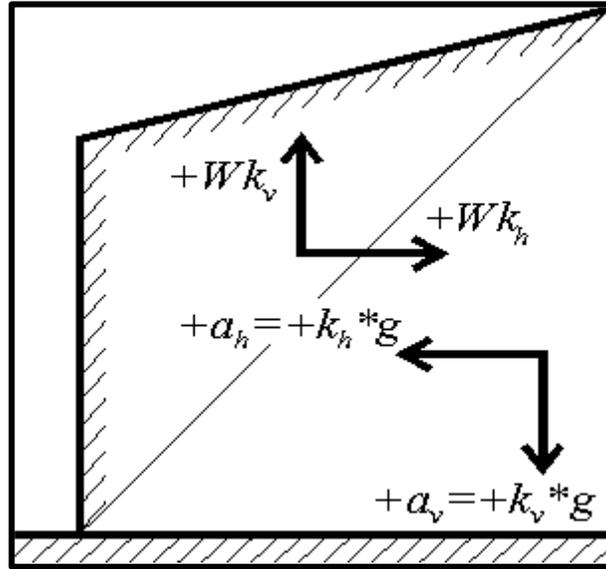
El coeficiente  $K_{pe}$  para la presión pasiva de la tierra está dado por:

$$K_{ps} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi + \alpha)}{\cos \psi \cos^2 \alpha \cos(\psi - \alpha + \delta) \left( 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \psi + \beta)}{\cos(\delta + \psi - \alpha) \cos(\beta - \alpha)}} \right)^2}$$

**Ecuación 6. Cálculo de coeficiente de presión pasiva de tierra**

Fuente: Mononobe N, Matsuo H, 1929

- Donde:
- $\gamma$  - Peso unitario del suelo
  - $H$  - Alto de la estructura
  - $\varphi$  - Ángulo de fricción interna del suelo
  - $\delta$  - Ángulo de fricción de la estructura - suelo
  - $\alpha$  - Inclinação de la cara posterior de la estructura
  - $\beta$  - Inclinação de la pendiente
  - $k_v$  - Coeficiente sísmico de la aceleración vertical
  - $k_h$  - Coeficiente sísmico de la aceleración horizontal
  - $\psi$  - Ángulo de inercia sísmico



**Figura 11. Convención de signos.**

**Fuente: Mononobe N.**

El ángulo sísmico de inercia es determinado por el coeficiente  $k_h$  y  $k_v$  (es decir ángulo entre el resultado de la fuerza de inercia y la línea vertical) usando la siguiente ecuación:

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{k_h}{1 - k_v} \right)$$

**Ecuación 7. Cálculo de ángulo sísmico de inercia**

Fuente: Mononobe N, Matsuo H, 1929

Donde:  $k_v$  - Coeficientes sísmicos de aceleración vertical  
 $k_h$  - Coeficientes sísmicos de aceleración horizontal

El incremento de la presión activa de la tierra debido a los efectos sísmicos (calculado desde el fondo de la estructura) viene dado por:

$$\sigma_{ae,i} = \sigma_{0,i} (K_{ae,i} - K_{a,i})$$

$$\sigma_{0,i} = \sum_0^H \gamma_i \cdot h_i (1 - k_v)$$

**Ecuación 8. Incremento de la presión activa de la tierra bajo efectos sísmicos.**

Fuente: Mononobe N, Matsuo H, 1929

- Donde:
- $\gamma_i$  - Peso unitario del suelo en la capa *ith*
  - $K_{ae,i}$  - Coeficiente de la presión activa de la tierra (estática y sísmica) en la capa *ith*
  - $K_a$  - Magnitud de la presión de la tierra en la capa *ith* según Coulomb
  - $h_i$  - Espesor de la capa *ith*
  - $k_v$  - Coeficiente sísmico de la aceleración vertical

Reducción de la presión pasiva debido a la carga sísmica (calculada desde la parte más profunda de la estructura) viene dada por:

$$\sigma_{pe,i} = \sigma_{0,i} (K_{p,i} - K_{pe,i})$$

$$\sigma_{0,i} = \sum_0^H \gamma_i \cdot h_i (1 - k_v)$$

**Ecuación 9. Reducción de la presión pasiva de la tierra bajo cargas sísmicas.**

Fuente: Mononobe N, Matsuo H, 1929

- Donde:
- $\gamma_i$  - Peso unitario del suelo en la capa *ith*
  - $K_{pe,i}$  - Coeficiente de la presión pasiva de la tierra (estática y sísmica) en la capa *ith*
  - $K_p$  - Magnitud de la presión de la tierra en la capa *ith* según Coulomb
  - $h_i$  - Espesor de la capa *ith*
  - $k_v$  - Coeficiente sísmico de la aceleración vertical

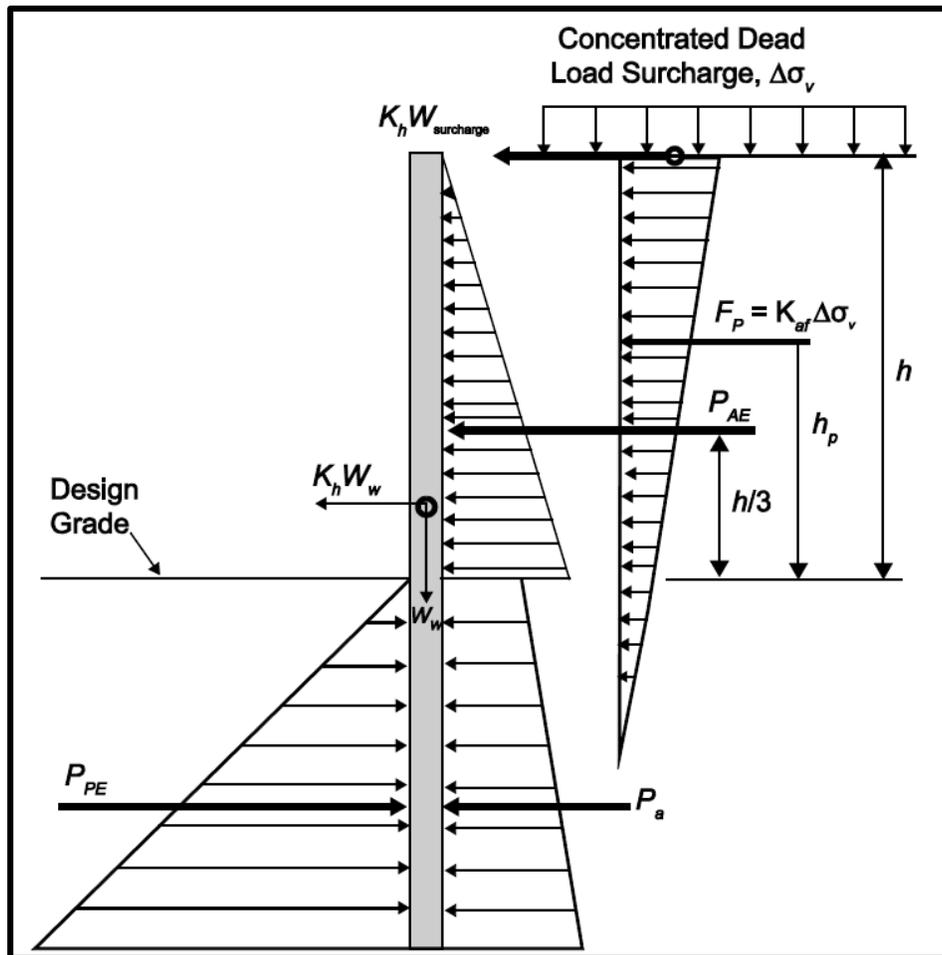


Figura 12. Diagrama de Fuerzas Sísmicas para la Evaluación de la Estabilidad Externa de pantalla en voladizo sin Gravedad.

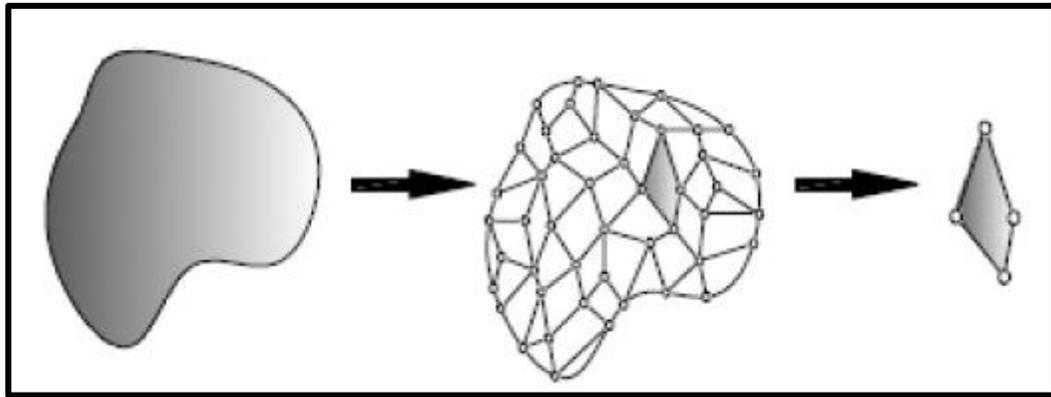
Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

#### 2.2.4.1. Método de Elementos Finitos

El método de elementos finitos es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería definida matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero resolver infinidad de problemas. El método de elemento finito requiere ser usado en computadoras. Este método fue inicialmente propuesto en 1967 por Clough y Woodward. De hecho, el método nació por evolución de aplicaciones a sistemas estructurales. Es un método que parte de las ecuaciones diferenciales de equilibrio, para todos los materiales implicados. Aplica las leyes constitutivas de los materiales y las condiciones de contorno, resultando en un sistema de ecuaciones algebraico. (Martínez, 2016, p. 20)

La aplicación de los elementos finitos en el cálculo de pantallas ha sido resultado de las incertidumbres y deficiencias dejadas por el resto de los modelos de cálculo, especialmente, de los métodos clásicos de diseño. La ventaja de estos métodos es que permite considerar una gran cantidad de aspectos del problema en cuestión, junto con la influencia de la mayoría de las variables que lo afectan, para lo cual se requiere definir una mayor cantidad de datos de entrada que en los modelos de cálculo comentados anteriormente.

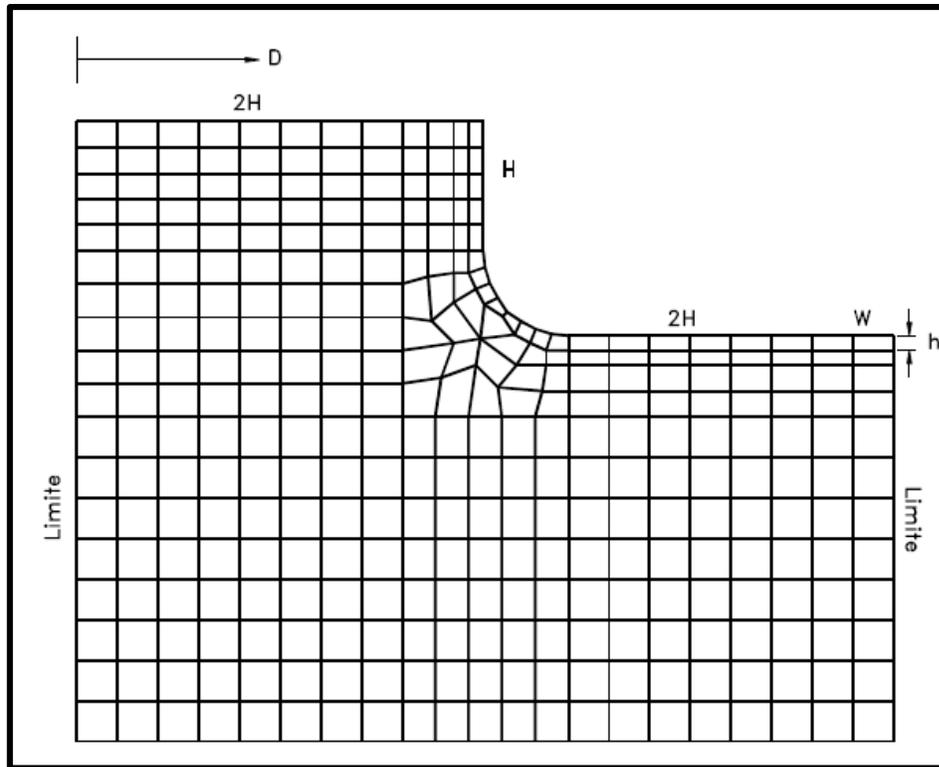
De acuerdo con lo anteriormente expuesto, además del perfil estratigráfico del terreno, la ubicación de la capa freática, las propiedades geotécnicas (densidad, cohesión, ángulo de fricción, entre otras), se deben considerar las propiedades tenso-deformaciones de los suelos, su estado de tensiones inicial y la deformabilidad de la pantalla. Por otra parte, en caso de que quiera simular el comportamiento no lineal del suelo y su parte plástica, se requiere más allá de la definición de un módulo de deformación y unos parámetros de resistencia, por lo que el problema se vuelve más complejo, especialmente, en la obtención de los datos precisos. (Sanhueza Plaza, 2008, p. 56)



**Figura 13. Esquema proceso de discretización.**

**Fuente: Martínez, 2016.**

En la figura 14 se muestra un mallado típico en 2 dimensiones para el análisis de un corte por elementos finitos.



**Figura 14. . Mallado típico para el análisis de un corte vertical por elementos finitos.**

**Fuente: Suárez Díaz, 1998.**

Generalmente, las mallas analizadas contienen elementos de tamaño uniforme con anchos ( $w$ ) y alturas ( $h$ ) iguales. El tamaño y forma de los elementos influye en forma importante sobre los resultados obtenidos. Es común que entre más pequeños sean los elementos se obtienen mayores niveles de esfuerzos de tensión en la cresta del talud, para el caso de la figura anterior. La altura del elemento es tal vez el factor más importante y se recomiendan por lo menos diez niveles de elementos entre el pie y la cabeza del talud para simular en forma precisa el comportamiento del talud. (Suárez Díaz, 1998, p. 135)

### **2.2.2. Antecedentes de las Metodologías**

Como en otros campos de la Ingeniería Geotécnica, los métodos de cálculo disponibles han ido evolucionando a medida que se ha dispuesto de herramientas de cálculo cada vez más potentes. Así, las primeras propuestas eran aproximaciones analíticas que nacían de otras aplicaciones geotécnicas. Posteriormente, la generalización de los programas informáticos ha llevado al empleo de programas de cálculo de estabilidad de taludes, junto con otros capaces de evaluar esfuerzos en pantallas (generalmente basados en modelos tipo Wilder, que sustituyen el terreno por muelles). Más recientemente, los métodos numéricos mediante elementos finitos o diferencias finitas han posibilitado el diseño global de este tipo de aplicaciones, utilizando siempre también algunas simplificaciones.

Cualquiera que sea el método por emplear, salvo si se usan métodos numéricos, pueden distinguirse dos fases principales de diseño:

1. La obtención de la fuerza de estabilización necesaria para lograr el factor de seguridad deseado.
2. El cálculo estructural de la pantalla para que soporte dicha fuerza. (Ortuño & Murillo, 2010, p. 2)

La primera fase se obtiene por medio del cálculo de estabilidad utilizando los métodos tradicionales de equilibrio límite, mientras que la segunda fase se debe realizar la estimación de distribución de la fuerza de estabilización de los pilotes, la obtención de esfuerzos en la pantalla y el cálculo estructural de la pantalla.

### **2.3 Conceptualización**

**Capacidad de carga:** Barreto M., González, & Ramírez, (2013), “Es de vital importancia comprender y calcular con precisión la capacidad de carga en cimentaciones profundas ya que estas son de común uso cuando la magnitud las cargas es elevada, o los suelos superficiales no tienen suficiente capacidad de soporte” (p. 1).

**Módulo de elasticidad:** “El módulo de elasticidad o modulo, es la pendiente de las curvas de esfuerzo deformación en la región elástica” (Askeland & Phule, 2006, P.198).

**Ductilidad:** “Es la propiedad que tiene un material para soportar grandes deformaciones sin fallar bajo esfuerzos alta tensión” (McCormac, 2008, P.2).

**Rigidez:** Se refiere a la capacidad de la estructura de para resistir cambios de forma (Por ejemplo, para ir alargamiento, flexión o torsión) y estabilidad se refiere a la habilidad de la estructura para resistir pandeo ante esfuerzos de compresión. (Gere J. & Goodno B., 2009)

Peck, Hanson, & Thornburn, (2011), Afirma: “**Los pilotes** se construyen en una gran variedad de tamaños, formas y materiales para adaptarse a muchos requisitos especiales, incluyendo la competencia económica” (p. 239).

Fernández Valdez, (2010), Afirma: “El **módulo de rigidez a la flexión** del pilote es una propiedad del pilote que depende de la rigidez del material con el cual está compuesto el pilote y del momento de inercia de la sección transversal del mismo” (p. 2).

## **2.4 Marco Legal**

En nuestro país, los diseños constructivos son avalados por el Código Hondureño de Construcción 2008 (CHOC-08), elaborado por el Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras y establecido como Norma Técnica. El CHOC-08 menciona

Ha sido elaborado con el objetivo fundamental de mejorar el diseño y construcción de las edificaciones en general, mediante la uniformidad de normas y el cumplimiento de las mismas. Además, se espera sea un instrumento de gran utilidad para estudiantes, ingenieros, arquitectos, constructores. Etc. (CHOC-08, 2008).

El Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras, formo una comisión técnica, para la elaboración del Código Hondureño de Construcción, conformados por profesionales con un gran conocimiento en el diseño y construcción, la comisión lo conformaron profesionales con titulación de ingenieros, master y doctorados.

El miércoles 22 de diciembre del 2010, el diario oficial de la Republica de Honduras, La Gaceta, publico el decreto establecido por el poder Judicial N°. 173-2010. Exponiendo

Que es potestad del Congreso Nacional, aprobar mediante Decreto Legislativo la implementación del Código Técnico de la Construcción, como marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad, seguridad y habitabilidad de los edificios y sus instalaciones para que el sector de la construcción se adapte a la estrategia de sostenibilidad económica, energética y medioambiental,

para garantizar la existencia de los edificios más seguros, más habitables, más sostenibles y de mayor calidad, de igual manera todas las infraestructura vial, portuaria y aeroportuaria. (Gaceta, 2010)

El Código Hondureño de Construcción elaborado por la comisión técnica, fue aprobado el siete de diciembre del dos mil siete, por la XXXIX Asamblea General Extraordinaria y decretado por el Poder Legislativo el 22 de diciembre del 2010, siendo presidente de la república el licenciado Porfirio Lobo Sosa y presidente del Congreso Nacional el abogado Juan Orlando Hernández Alvarado.

Esta investigación se apoyará del CHOC-08, al igual que de otras Normas, Publicaciones, Tesis, Libros, con el fin de enriquecer su contenido.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Para analizar el comportamiento de una pantalla de pilotes es posible realizarlo mediante dos metodologías, la primera a través de un análisis de equilibrio límite, el cual asume un estado de equilibrio para en el que se presenta la falla, a partir de coeficientes de seguridad garantizando la estabilidad global, la segunda mediante el método de elementos finitos, el cual divide los elementos en unidades discretas que se interconectan en nodos y bordes predefinidos, para así obtener esfuerzo y deformaciones en los puntos nodales.

Se realizó las comparaciones entre las dos metodologías para determinar las diferencias de resultados y determinar la eficiencia de cada una.

### **3.1 Método del Equilibrio Límite**

#### **3.1.1. Tipo y nivel de investigación**

Es importante definir la ruta a seguir para el desarrollo de una investigación, para así poder establecer los lineamientos que se adapten para el cumplimiento de los objetivos del trabajo de investigación, por lo que se identifica que el tipo de estudio realizado tendrá un alcance descriptivo, debido a que se desea medir la información obtenida.

Se determinó utilizar un enfoque mixto de investigación, porque se espera obtener información de carácter cuantitativo y cualitativo para el desarrollo de las variables de investigación.

#### **3.1.2 Descripción del ámbito de la investigación**

La investigación es de carácter no experimental de corte transversal, debido que en el estudio no se realizará la manipulación deliberada de variables independientes y se observarán los

fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos, estos datos serán recolectados en una fecha determinada y única, con la finalidad de describir la incidencia en momento dado.

### **3.1.3 Población y Muestra**

Para obtener información relevante a la investigación se tomó en consideración como población a 24 empresas entre contratistas y consultoras en Tegucigalpa, que se encuentren en el proceso, ya sea en el diseño o en la construcción de muros pantallas con pilotes en los proyectos de infraestructura vial de la ciudad de Tegucigalpa.

En cuanto a la muestra obtenida se consideró debido a las limitaciones de tiempo para aplicar los instrumentos de recolección de datos y debido a la poca accesibilidad de información de ciertas empresas, evaluar la muestra con un total de 12 empresas, mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia.

### **3.1.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

Con la finalidad de obtener la recolección de datos de la muestra seleccionada, se realizó una encuesta electrónica, en la cual se obtuvo información de carácter cuantitativo y cualitativo de mucha importancia sobre el tema de investigación. (Ver Anexo 1).

### **3.1.5 Plan de recolección y procesamiento de datos**

La aplicación de la encuesta se aplicó dentro del periodo del 27 de agosto al 10 de septiembre del presente año, utilizando medios electrónicos por lo que la ubicación de la aplicación no fue un obstáculo.

Para el procesamiento de datos se utilizó la herramienta de Microsoft Excel, por medio de gráficos para ilustrar de una mejor manera los resultados.

## **3.2 Método de Elementos Finitos**

### **3.2.1. Descripción del ámbito de la investigación**

La investigación es de carácter no experimental de corte transversal, debido que en el estudio no se realizará la manipulación deliberada de variables independientes y se observarán los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos, estos datos serán recolectados en una fecha determinada y única, con la finalidad de describir la incidencia en momento dado.

### **3.2.2 Población y Muestra**

Para obtener información relevante a la investigación se tomó en consideración como población a 24 empresas entre contratistas y consultoras en Tegucigalpa, que se encuentren en el proceso. Ya sea en el diseño o en la construcción de muros pantallas con pilotes en los proyectos de infraestructura vial de la ciudad de Tegucigalpa.

En cuanto a la muestra obtenida se consideró debido a las limitaciones de tiempo para aplicar los instrumentos de recolección de datos y debido a la poca accesibilidad de información de ciertas empresas, se determinó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, evaluar la muestra con un total de 12 empresas por medio de un representante designado para aplicar la entrevista.

### **3.2.3 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

Con la finalidad de poder obtener la recolección de datos de la muestra seleccionada, se realizó una entrevista a especialistas de cada empresa, en la cual se obtendrá información de carácter cuantitativo y cualitativo de mucha importancia sobre el tema de investigación. (Ver Anexo 2).

### **3.2.4 Plan de recolección y procesamiento de datos**

La aplicación de la entrevista se aplicó dentro del periodo del 27 de agosto al 10 de septiembre del presente año, utilizando tanto medios electrónicos como entrevista personal a cada lugar de trabajo.

Para el procesamiento de datos se utilizó la herramienta de Microsoft Excel, por medio de gráficos para ilustrar de una mejor manera los resultados.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestra los resultados obtenidos de los instrumentos de recolección de datos, se utilizó la entrevista y la encuesta, además se presentan los resultados de análisis de comparación entre el método de elementos finitos y el método del equilibrio límite para el diseño de muro pantalla de pilotes.

### 4.1 Resultados de encuesta

La aplicación de las encuestas se dirigió a profesionales con experiencia en muros pantalla de pilotes, ya sea en construcción, diseño o supervisión.

¿En qué empresa labora?

Por medio de la información recopilada de los profesionales encuestados, se generó una lista de lugares donde trabajan para ver el medio donde se desempeñan como profesionales y analizar si su experiencia cotidiana es favorable para la encuesta de esta investigación.

Resultados:

**Tabla 1. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 1 de la encuesta.**

1. ¿En qué empresa labora?
INSEP
GEO TECNICA
GEOCONSULT
IHSS
J.F. CONSTRUCCIONES
TECNISA
CONSULTOR INDEPENDIENTE

SERVICIOS DE INGENIERIA SG.
CNC
INAO
ELECNOR
GIA MÉXICO

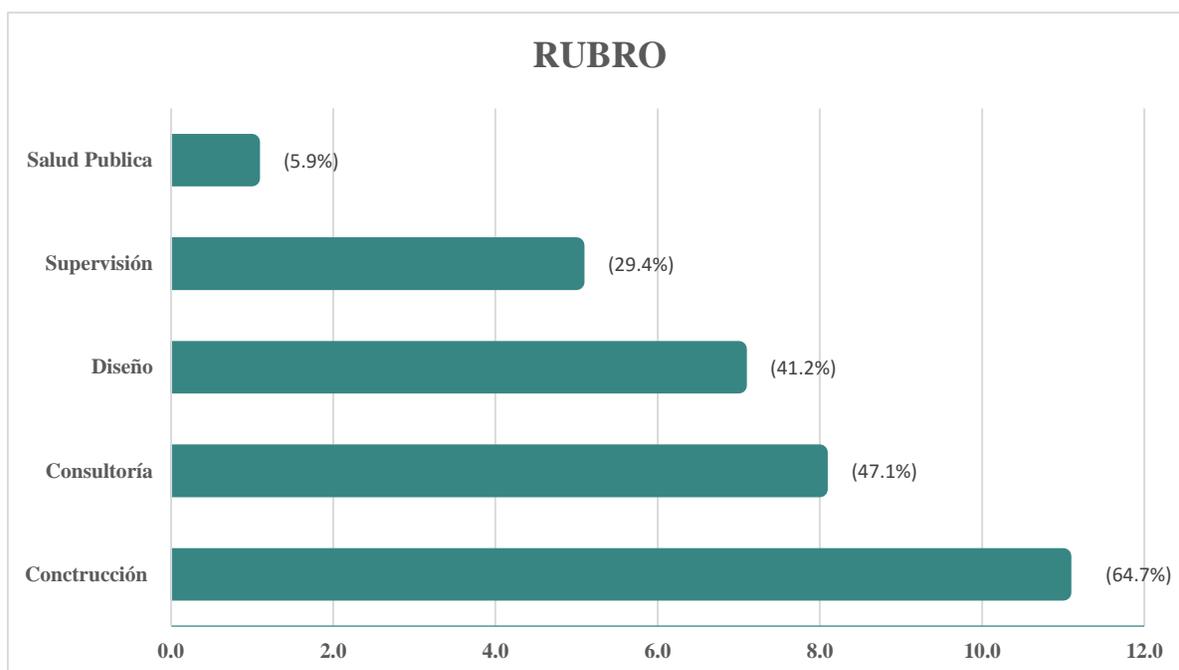
1. ¿Cuál es el rubro en el que se desempeña su empresa?

El objetivo de esta pregunta es identificar en que medio trabajan o se desenvuelven los encuestados.

Resultados:

**Tabla 2. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 2 de la encuesta.**

2. ¿Cuál es el rubro en el que se desempeña su empresa?	
INSEP	CONSTRUCCIÓN, CONSULTORÍA, DISEÑO, SUPERVISIÓN
GEO TECNICA	CONSTRUCCIÓN, DISEÑO
GEOCONSULT	CONSULTORÍA, DISEÑO, SUPERVISIÓN
IHSS	SALUD PUBLICA
GEOTECNICA SOLUCIONES	CONSTRUCCIÓN, DISEÑO
GEOCONSULT	CONSTRUCCIÓN, CONSULTORÍA, DISEÑO, SUPERVISIÓN
J.F. CONSTRUCCIONES	CONSTRUCCIÓN
TECNISA	CONSULTORÍA
CONSULTOR INDEPENDIENTE	CONSULTORÍA
SERVICIOS DE INGENIERIA SG.	CONSTRUCCIÓN
CNC	CONSTRUCCIÓN, CONSULTORÍA, DISEÑO, SUPERVISIÓN
INAO	CONSTRUCCIÓN
ELECNOR	CONSTRUCCIÓN, DISEÑO, SUPERVISIÓN
GIA MÉXICO	CONSTRUCCIÓN



**Figura 15. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 2 de la encuesta.**

**Tabla 3. Porcentaje de áreas de trabajo por rubro.**

RUBRO	
AREA	%
Construcción	64.7%
Consultoría	47.1%
Diseño	41.2%
Supervisión	29.4%
Salud Pública	5.9%

### 3. ¿Su empresa ha desarrollado proyectos en la Ciudad de Tegucigalpa?

Esta investigación está basada en el comportamiento de pantalla de pilotes de concreto para túneles vehiculares para distintos tipos de suelo en Tegucigalpa, por lo que considera que filtrar la experiencia de los profesionales encuestados en el área de Tegucigalpa es importante, para ver la interacción de los encuestados con los medios constructivo.

Resultados:



**Figura 16. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 3 de la encuesta.**

4. ¿Dentro de la experiencia que posee la empresa en la que usted se desempeña, ha estado involucrada en proyectos relacionados con muros pantallas de pilotes en la ciudad de Tegucigalpa?

Esta investigación utiliza esta cuarta pregunta, como un último filtro, donde separa a los profesionales y empresas que tiene experiencia en el diseño, construcción y supervisión de muros pantalla de los profesionales y empresas que no la tienen, de los profesionales encuestados el 82.40% de ellos aseveran que dentro de la experiencia que poseen las empresas para las cuales

trabajan, han estado involucrados en proyectos de muros pantallas de pilotes y el 17.60% aseveraron con que sus empresas no poseen la experiencia.

Resultados:

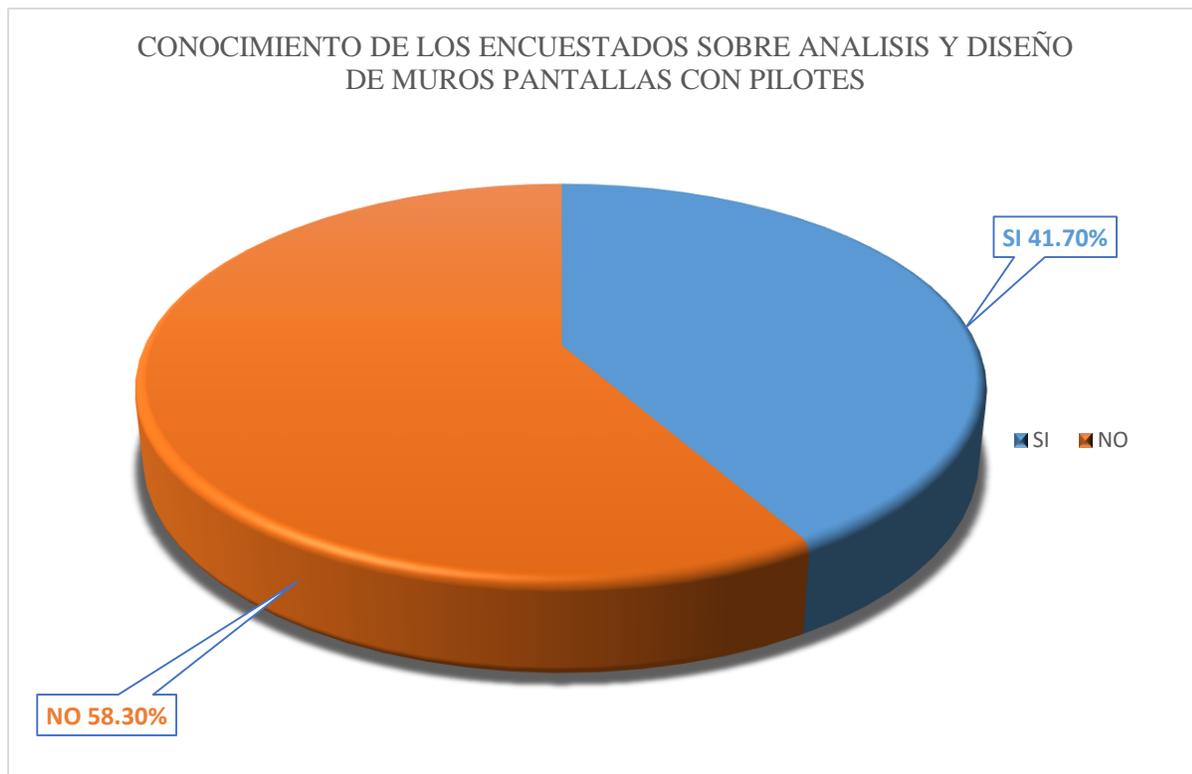


**Figura 17. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 4 de la encuesta.**

5. ¿Conoce usted algún método para el análisis y diseño de muros pantallas con pilotes? Si su respuesta es “NO”, pase a la pregunta 7

Esta pregunta verifica la experiencia de los encuestados en el manejo análisis de muro pantalla, de los profesionales encuestados el 41.70% aseveran de conocer métodos para el análisis y diseño de muros pantallas y el 58.30% desconocen las metodologías de análisis y diseño.

Respuesta:



**Figura 18. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 5 de la encuesta.**

6. Justifique respuesta positiva de la pregunta 5

De los profesionales encuestados, el 41.70% de ellos, consideraron su justificación de la pregunta cinco (5), algunas de las respuestas expuestas por los encuestados para los pilotes hincados se requiere un análisis de ecuación de onda, interacción suelo estructura, análisis por elementos finitos de segundo orden, de los cuales hacen llamados a software como CYPE CAD o LAIS y mencionan la importancia de los factores de seguridad (Fs.).

Respuestas:

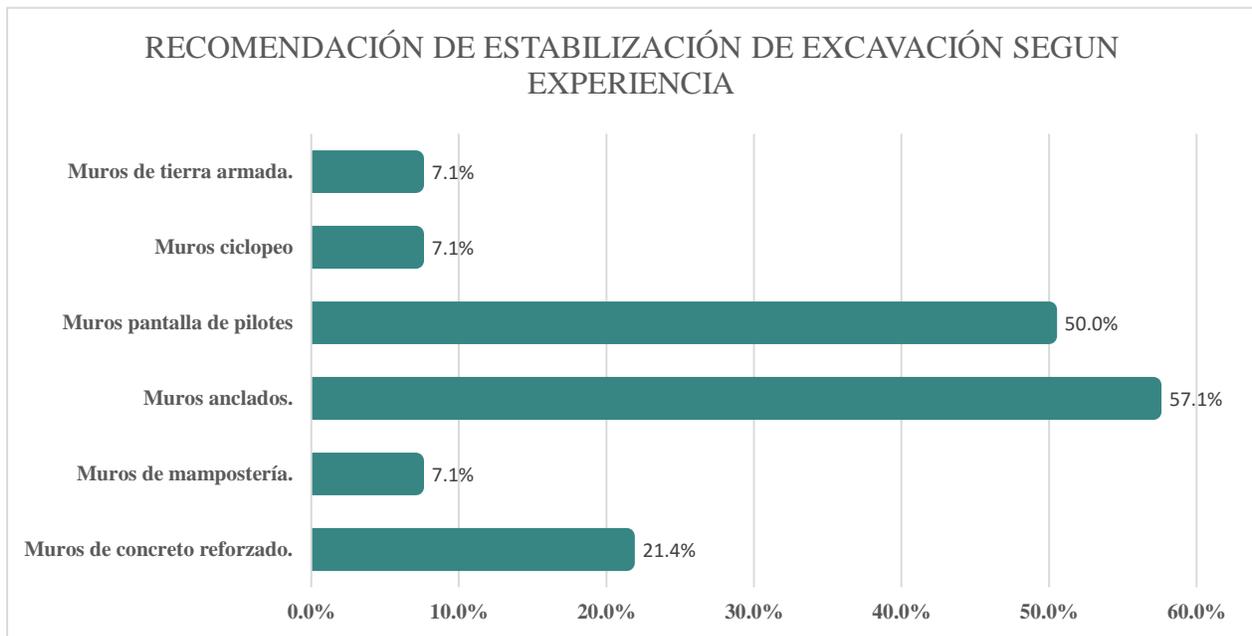
Esta pregunta fue abierta lo que imposibilitó el análisis estadístico

7. ¿Qué metodología para estabilización de excavaciones para túneles es el más recomendado según su experiencia?

Los profesionales encuestados muestran su experiencia en la estabilidad de túneles y expresan su experiencia en el tema.

El 57.1 % recomiendan los muros anclados y el 50.0% recomiendan los muros pantalla de pilotes.

Respuesta:



**Figura 19. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 7 de la encuesta.**

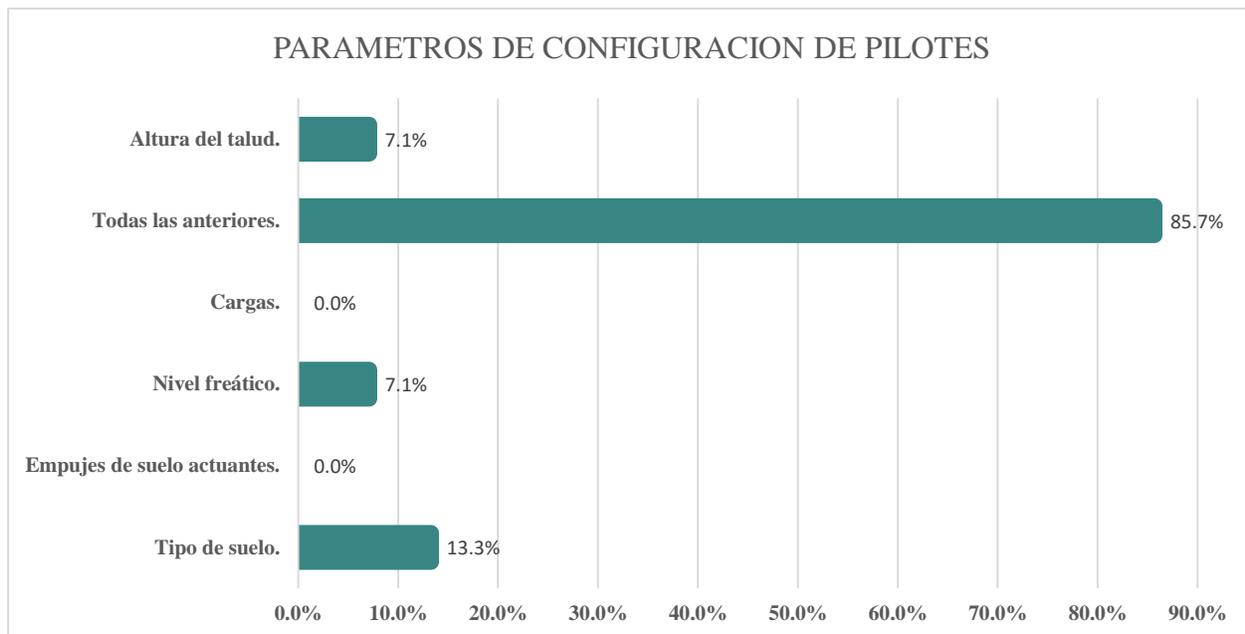
**Tabla 4. Porcentaje de recomendación para estabilidad de túneles.**

7. ¿Qué metodología para estabilización de excavaciones para túneles es el más recomendado según su experiencia?	
Muros de concreto reforzado.	21.4%
Muros de mampostería.	7.1%
Muros anclados.	57.1%
Muros pantalla de pilotes	50.0%
Muros ciclópeos	7.1%
Muros de tierra armada.	7.1%

8. ¿Qué determina la elección de la configuración de los pilotes tangentes, secantes o separados?

La respuesta de esta pregunta muestra los parámetros que consideran los entrevistados para la configuración de los pilotes. El 87.5% coinciden que es determinante considerar el tipo de suelo, el empuje del suelo actuante, el nivel freático, las cargas de diseño y la altura del talud para la configuración del pilote.

Respuesta:



**Figura 20. Porcentaje de parámetros para la configuración de pilotes.**

**Tabla 5. Porcentaje de parámetros para la configuración de pilotes.**

8. ¿Qué determina la elección de la configuración de los pilotes tangentes, secantes o separados?	
Tipo de suelo.	13.3%
Empujes de suelo actuantes.	0.0%
Nivel freático.	7.1%
Cargas.	0.0%
Todas las anteriores.	85.7%
Altura del talud.	7.1%

9. ¿Mencione los procesos constructivos de perforación de pilotes que usted ha observado?

Los profesionales encuestados en los procesos constructivos que van desde marcación de puntos para la excavación de los pilotes hasta el colocado del pilote y en cuanto los métodos observados mencionan los pilotes hincados, pilotes fundidos in situ, muros anclados, micro pilotes y pantallas ancladas.

Respuesta:

**Tabla 6. . Procesos constructivos y métodos observados.**

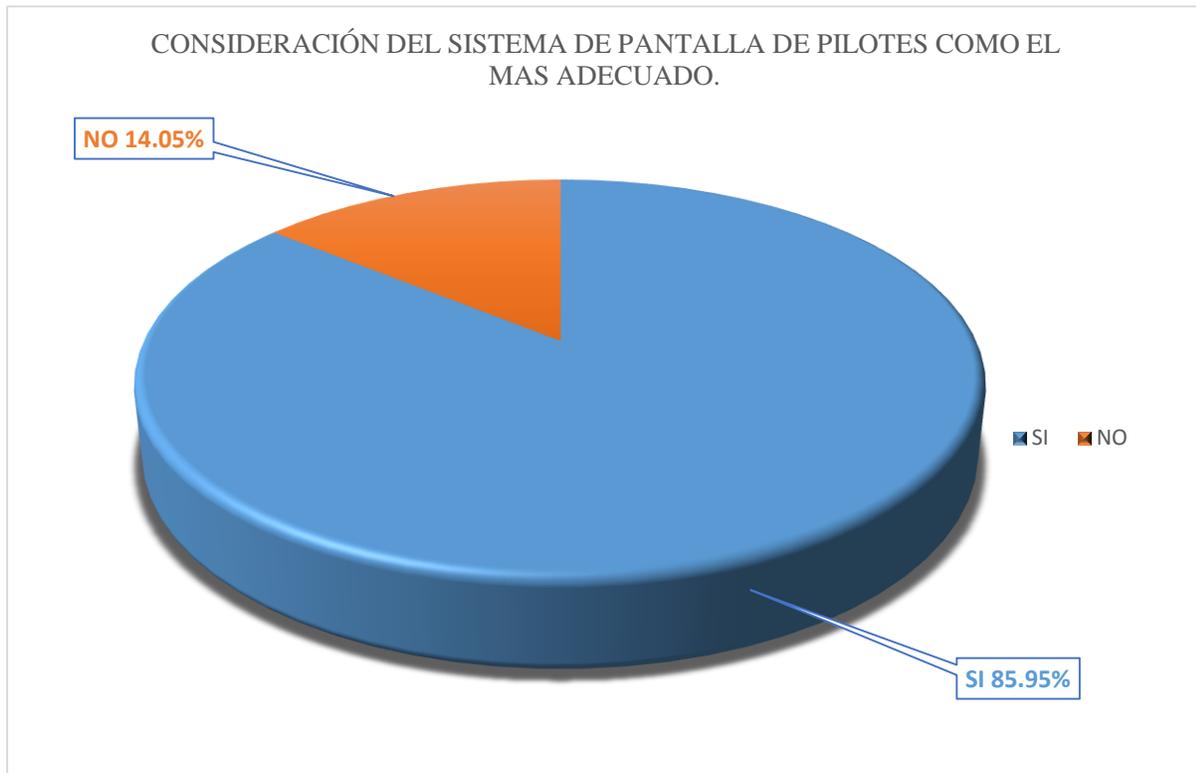
9. ¿Mencione los procesos constructivos de perforación de pilotes que usted ha observado?
<b>Proceso constructivo:</b>
Marcación de puntos, elegir el método o herramienta de perforación, remoción de material extraído, verificación de profundidad, colocación de acero, colado de pilote
<b>Métodos:</b>
Pilotes hincados
Pilotes fundidos in situ
Perforado y colocado In situ.
CFA
Muros Anclados
Micro pilotes
Pantallas Ancladas

10. ¿Considera que el sistema de pantalla de pilotes es el más adecuado para la construcción de pasos vehiculares subterráneos? Justifique su respuesta.

Esta investigación utiliza esta pregunta para determinar mediante los profesionales encuestados la importancia del sistema de pantallas de pilotes y determinar si es el método más

adecuado para los pasos vehiculares, el 87.5% de los encuestados determinaron que, si están de acuerdo, que el uso de las pantallas de pilotes es el sistema más adecuado, su respuesta es justificada en la pregunta 11 de la encuesta.

Respuesta:



**Figura 21. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 10 de la encuesta.**

11. Justifique respuesta de la pregunta 10

Los profesionales encuestados al justificar la respuesta de la pregunta 9, coinciden en que, con el factor económico, en la rapidez constructiva, método poco invasivo, la seguridad del método, y por último mencionan la poca molestia a la población.

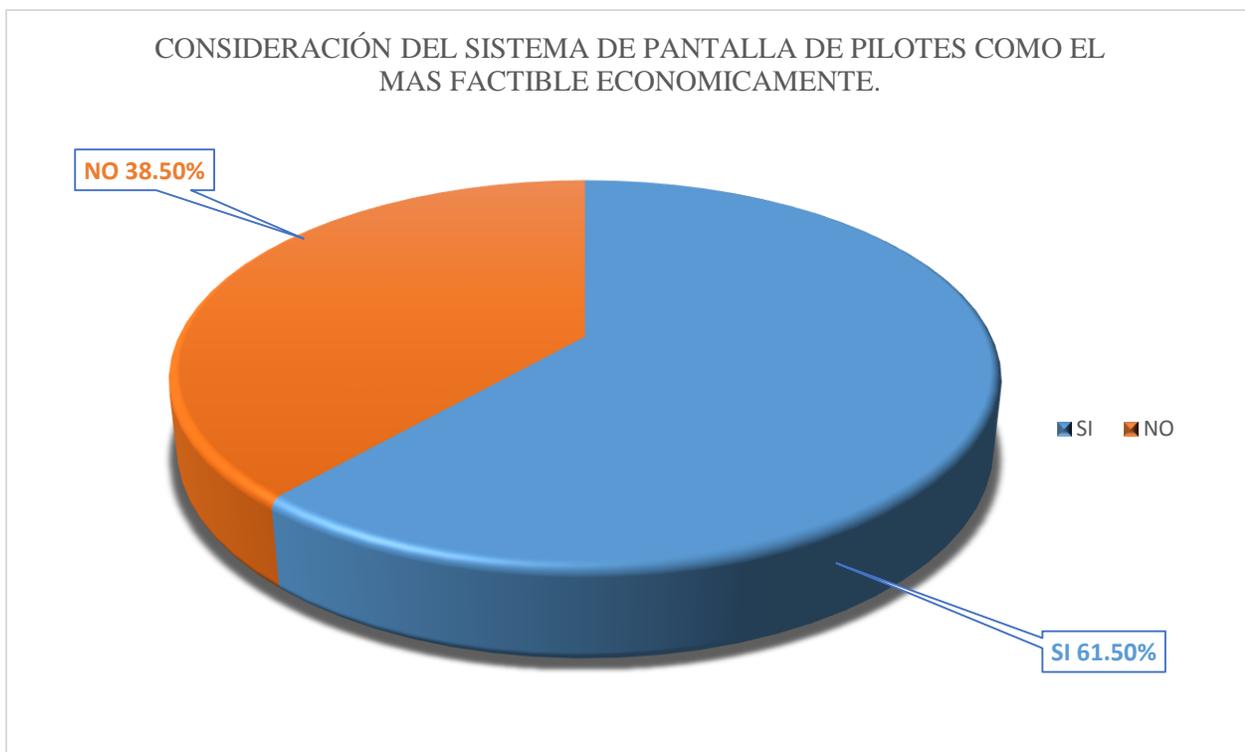
Respuesta:

Esta pregunta fue abierta lo que imposibilitó el análisis estadístico.

12. ¿Considera que las pantallas de pilotes como sistema de retención en túneles, es el más factible económicamente en comparación a otros sistemas? Justifique su respuesta.

De los profesionales encuestados el 61.50% de los encuestados, consideran que el sistema de retención de pantallas de pilotes, para túneles, es el más factible económicamente en comparación a otros sistemas, su respuesta es justificada en la pregunta 13.

Respuesta:



**Figura 22. Correspondiente a la respuesta de la pregunta 12 de la encuesta.**

13. Justifique respuesta de la pregunta 12

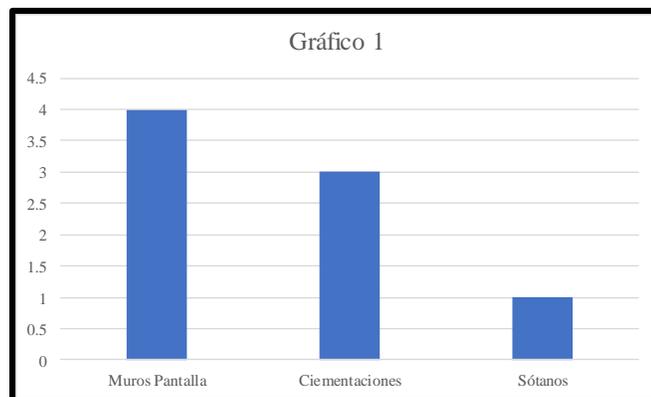
Los entrevistados al justificar la respuesta de la pregunta 12, coincidieron que el sistema de pantalla de pilotes es el más económico debido al tiempo en ejecución, este al ser menor, reduce el tiempo en que se incomoda a la población a su alrededor, también consideran que al llevar menos material su costo es menor.

#### 4.2 Resultados de entrevista

Esta investigación, realizó la entrevista a 4 profesionales de alto prestigio, que trabajan en empresas en Tegucigalpa que se dedican al diseño, construcción y supervisión de sistemas de pantalla de pilotes, se obtuvieron lineamientos para obtener los parámetros adecuados en el diseño geotécnico y estructural. Las preguntas realizadas fueron;

En la pregunta número uno, se pidió que comentarán su experiencia en base a pilotes, ya sea como elementos de cimentación, como elementos de retención. La mayoría coincidieron que han tenido experiencia en proyectos de muros pantalla para túneles, los cuales se están desarrollando en Tegucigalpa, específicamente mencionaron como ejemplo el túnel que se encuentra en ejecución en la Colonia 21 de octubre.

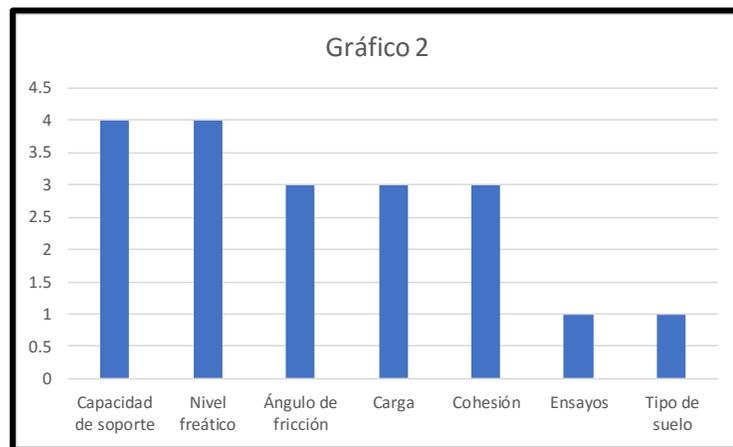
En el gráfico 1, se observa que, de los profesionales entrevistados, coinciden en su mayoría experiencia en muros pantalla, como segundo lugar los pilotes como sistemas de cimentación.



**Figura 23. Experiencia profesional de los entrevistados.**

En la pregunta número dos, se pidió que comentarían con que tipología de pilotes han tenido la oportunidad de desarrollar dentro de su experiencia profesional. La mayoría coincidieron en que en Tegucigalpa la metodología de pilotes más utilizada y más conveniente, debido a la geología de la zona son los pilotes perforados y fundidos en situ.

En la pregunta número tres, se consultó cuáles son los aspectos por considerar en el diseño de muros pantalla. Destacan en su mayoría parámetros geotécnicos como capacidad de soporte del suelo, cohesión, ángulo de fricción, etc. En la siguiente gráfica se observa cuáles son los parámetros que en su mayoría coincidieron los entrevistados.



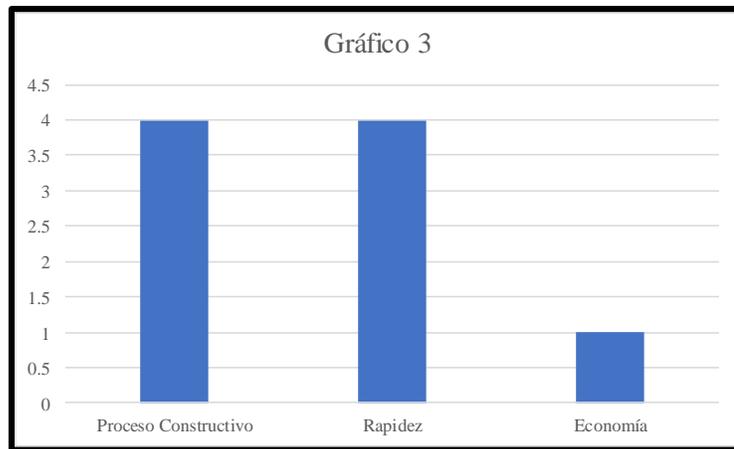
**Figura 24. Parámetros de diseño según entrevistados.**

En la pregunta número cuatro, se consultó de qué depende la longitud de empotramiento de los pilotes en un muro pantalla. Esta respuesta fue variable, según el criterio de cada entrevistado, mencionaron que era necesario un estudio de suelos para determinarlo, 1/3 de la altura del pilote o el 60% de la altura de este.

En la pregunta número cinco, se consultó que parámetros utilizan para el pre-dimensionamiento y espaciamiento de los pilotes. Esta pregunta al igual que la anterior, la respuesta

fue variable, según el criterio de cada entrevistado, mencionaron que dependía del tipo de suelo y las cargas sometidas, como también que se manejan espaciamientos de 1.00 – 1.50 m de centro a centro.

En la pregunta número seis, se consultó la razón por la que considera que los sistemas de muros pantalla están siendo muy utilizados en Tegucigalpa. Destacan en su mayoría, el proceso constructivo, el cual es rápido, no obstaculiza el tráfico y es poco invasivo. En la siguiente gráfica se observa cuáles son las razones que en su mayoría coincidieron los entrevistados.



**Figura 25. Respuestas más comunes de la pregunta seis.**

### **4.3 Descripción de los Análisis**

En esta investigación se desarrolló un análisis del comportamiento de muros pantalla de pilotes bajo condiciones específicas de suelos típicos de la ciudad de Tegucigalpa, se propone comparar dos metodologías para el diseño de muros pantalla, el método del equilibrio límite y el método de elementos finitos, con el fin de identificar las diferencias, limitaciones y ventajas entre sí, y de esta manera determinar mediante los resultados obtenidos, cual entre las dos metodologías presenta un diseño más óptimo y económico.

Como se ha mencionado anteriormente el método del equilibrio límite es un método empírico basados en modelos teóricos que toman en cuenta el comportamiento en servicio de la estructura en el momento de falla, proporcionando resultados bastante aproximados para el momento flector máximo y esfuerzo cortante. En cuanto a la aplicación de los elementos finitos para el cálculo de muros pantallas ha sido producto de las incertidumbres dejadas por el resto de los modelos clásicos de cálculo de diseño. Debido a que este método considera una gran cantidad de aspectos del problema, requiere de una mayor cantidad de parámetros de diseño a considerar como datos de entrada.

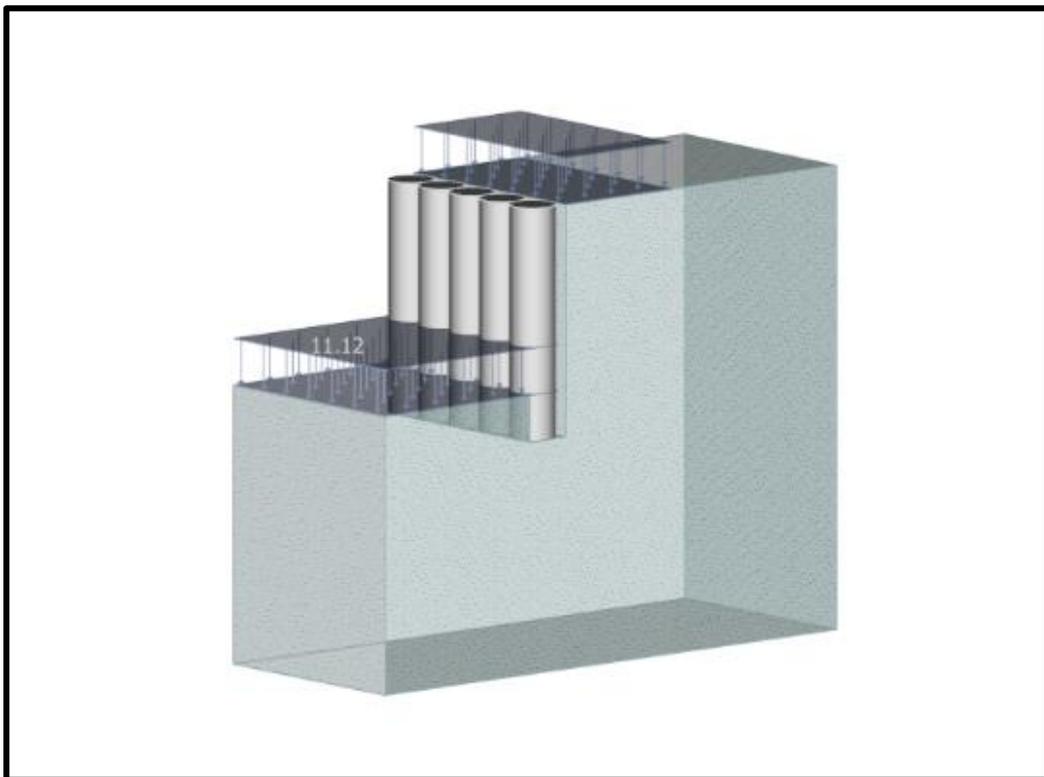
### **4.4 Caso de Aplicación**

Se presentan cinco casos de cálculo modificando el tipo de suelo en cada uno, suelos típicos en la ciudad de Tegucigalpa, en donde se están ejecutando proyectos de Pasos subterráneos. Los estratos de suelos utilizados son: arena arcillosa, arcilla ligera, lutita, los cuales se presentan en zonas como Las Lomas, Juan Pablo II, Col. 21 de Octubre entre otras; arena limosa y toba, las cuales podemos encontrar en zonas como el Aeropuerto, La Cañada, Anillo Periférico.

Se ha definido parámetros fijos para este análisis, para todos los casos se está considerado una excavación de 4 metros, según la altura máxima del Túnel Bulevar San Juan Bosco, la pantalla

consta de pilotes con diámetros y longitudes variables que dependen de las características mecánicas del tipo de suelo, separados a 1 metro centro a centro por especificaciones del proyectista. Se está considerando una carga al pie de la pantalla y una sobrecarga, ambas con un valor de  $11.12 \text{ kN/m}^2$ , dato obtenido de una memoria de cálculo de un túnel realizado en la ciudad de Tegucigalpa.

Para este análisis no se está considerando los efectos del sismo ni efectos de niveles freáticos, también es recalcar que se está analizando con un solo estrato de suelo en cada caso de estudio, en la siguiente figura se muestra un esquema geométrico de la pantalla utilizada en los análisis.



**Figura 26. Esquema geométrico de muro pantalla de pilotes.**

#### 4.5 Parámetros de Diseño

Para realizar los modelos matemáticos se definieron los parámetros geotécnicos y estructurales de los materiales utilizados. Como se ha mencionado anteriormente se realizó cinco casos prácticos con distintos tipos de suelos, estos parámetros fueron obtenidos de la empresa GeoConsult S.A., la cual ha desarrollado estudios de suelos a nivel nacional y cuentan con una base de datos de parámetros geotécnicos obtenidos de los múltiples ensayos de laboratorio que realizan a las muestras obtenidas de los estudios de suelos que han desempeñado.

Tegucigalpa está compuesta de varias formaciones geológicas, se han obtenidos parámetros geotécnicos de suelos pertenecientes a las formaciones Grupo Padre Miguel ( $T_{pm}$ ), que consta de secuencias ignimbritas principales de tobas riólitas, dacíticas y andesíticas de varios colores, el material de Toba y Arena limosa forma parte de este grupo.

Los suelos denominados lutita, arena arcillosa y arcilla ligera, pertenecen a la formación Río Chiquito ( $K_{rc}$ ), consta de lutitas, limonitas, areniscas rosadas y algunas capas de conglomerado de cuarzo.

En la tabla 7 se resume los parámetros geotécnicos de diseño de cada material utilizados en los modelos matemáticos de las dos metodologías, obtenidos de estudios de suelos realizados para proyectos de pasos subterráneos en la ciudad de Tegucigalpa:

**Tabla 7. Parámetros geotécnicos de diseño**

<b>Material</b>	<b>Peso (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso saturado (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cohesión (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ángulo de Fricción</b>	<b>Módulo de Elasticidad (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Poisson</b>
Arena Limosa	18.05	20.50	35.30	10.00	6864.76	0.30
Toba	20.4	20.40	68.65	23.90	166578.41	0.22
Arcilla Ligeras	17.46	18.50	22.56	20.00	8629.99	0.28
Lutita	23.15	23.15	18.90	13.00	7845.00	0.25
Arena Arcillosa	17.01	18.90	4.90	23.00	9316.47	0.28

**Fuente: GeoConsult S.A.**

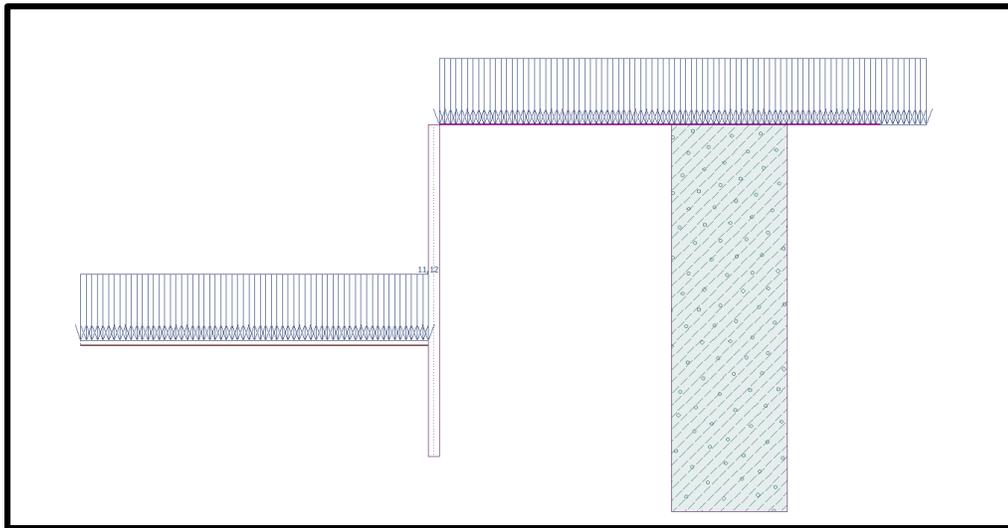
Los pilotes están constituidos de concreto con una resistencia a la compresión de 280 kg/cm<sup>2</sup> y acero de grado 60.

#### **4.5 Programas de Cálculo Utilizados**

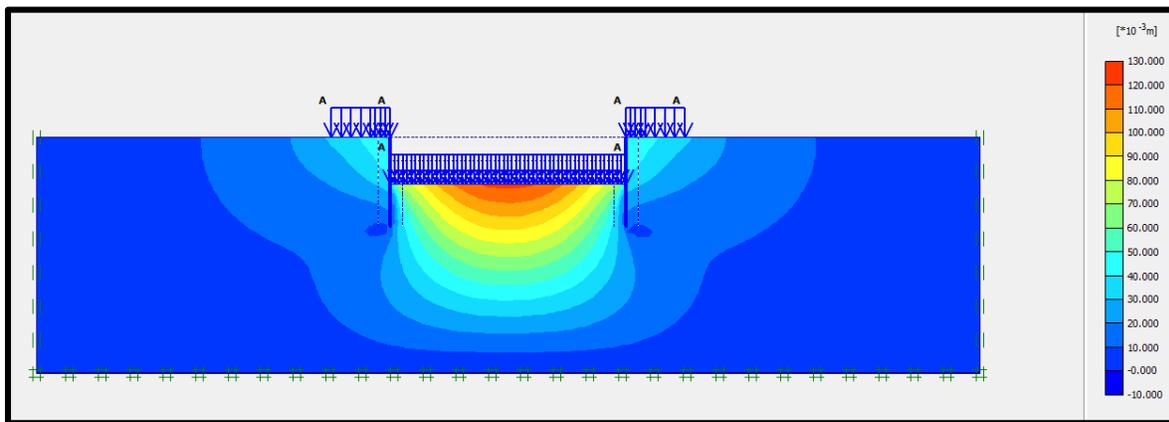
Mediante el software denominado GEO5 desarrollado por Fine Civil Engineering Software, en su módulo Diseño de Muros Pantalla, es un programa para diseño de muros de contención que utiliza como base teórica el método del equilibrio limite, el cual calcula longitudes de empotramiento y las fuerzas internas de la estructura.

Para el método de elementos finitos se utilizó el programa Plaxis 2D – V 8.0, creado por la Universidad de Delft, el cual se basa en elementos finitos bidimensionales que permiten realizar análisis de deformaciones y estabilidad de problemas geotécnicos. El programa permite modelar los diferentes componentes del problema mediante un conjunto de elementos discretos, conectados entre sí a través de puntos comunes denominados nodos. Para el cálculo se utilizó el modelo de comportamientos Mohr-Coulomb.

En la figura 24 se muestra el modelo realizado en el programa GEO5, mientras que en la figura 25 se muestra el modelo realizado en Plaxis 2D.



**Figura 27. Modelo realizado en el programa GEO5.**



**Figura 28. Modelo realizado en el programa PLAXIS 2D.**

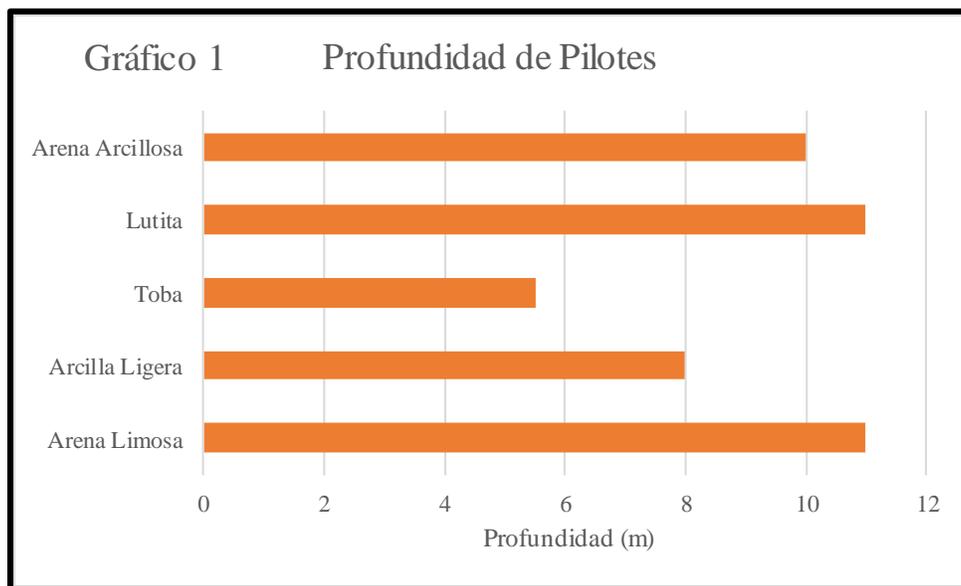
Para el diseño estructural del pilote se utilizó la herramienta CSICol, para así determinar la canasta de acero con que estará compuesto el elemento, este programa es usado para diseño de columnas, por lo que el pilote se trabaja como una columna circular.

#### 4.6 Análisis Técnico

Para poder efectuar la comparación de los resultados obtenidos a partir de un modelo a otro, se calculó la profundidad de empotramiento mínima con GEO5 y esta longitud se empleó para los análisis realizados en el programa Plaxis 2D.

Una vez que se verificó que la longitud de empotramiento cumple con la estabilidad mínima en todos los casos, el cual difiere según el tipo de suelo, se comparó el valor de momentos máximo y esfuerzo de corte (positivo y negativo) de ambas metodologías.

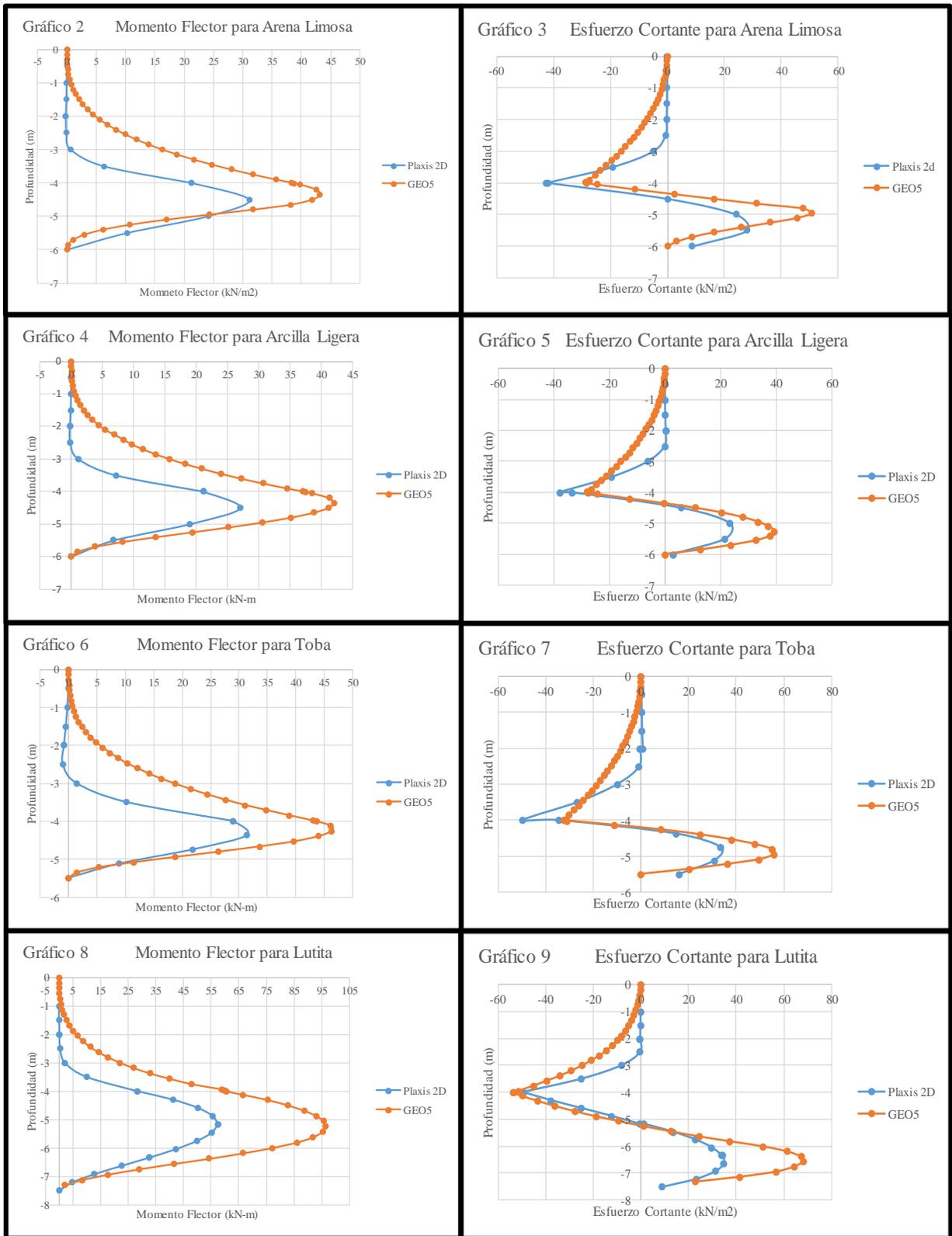
En la gráfica 1 se observa que la longitud del pilote depende del tipo de suelo, obteniendo mayores profundidades de pilotes para la arena limosa, y menor longitud para una toba que posee mejor resistencia que los demás estratos en análisis.



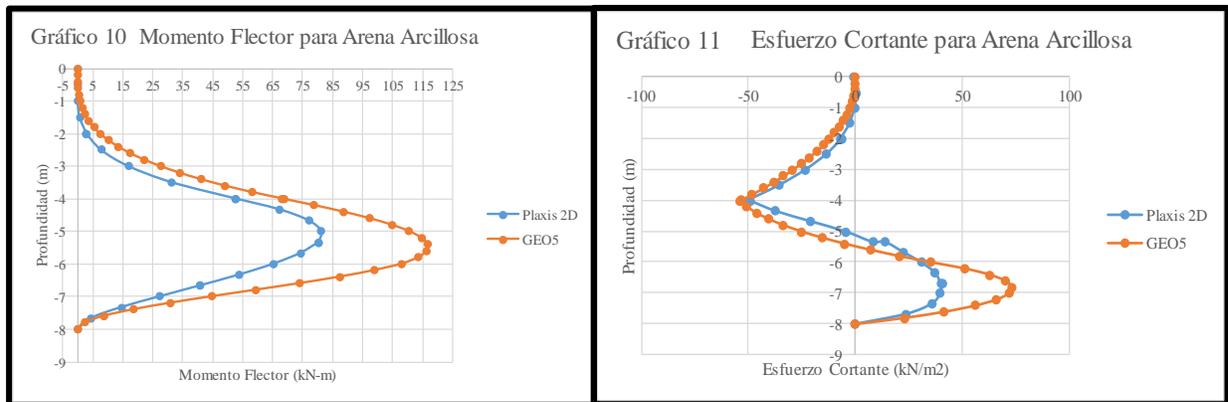
**Figura 29. Gráfico de profundidad de pilotes según el tipo de suelo.**

De acuerdo con los resultados obtenidos de los gráficos 2 – 11, podemos observar que en términos generales el momento flector calculado con el método de equilibrio limite (GEO5), es mayor entre un 27 – 40%, con respecto al calculado con el método de elementos finitos (Plaxis

2D). Mientras que para el esfuerzo cortante positivo obtenido con GEO5 es mayor entre un 44 – 48%, con respecto al calculado con el programa Plaxis 2D.

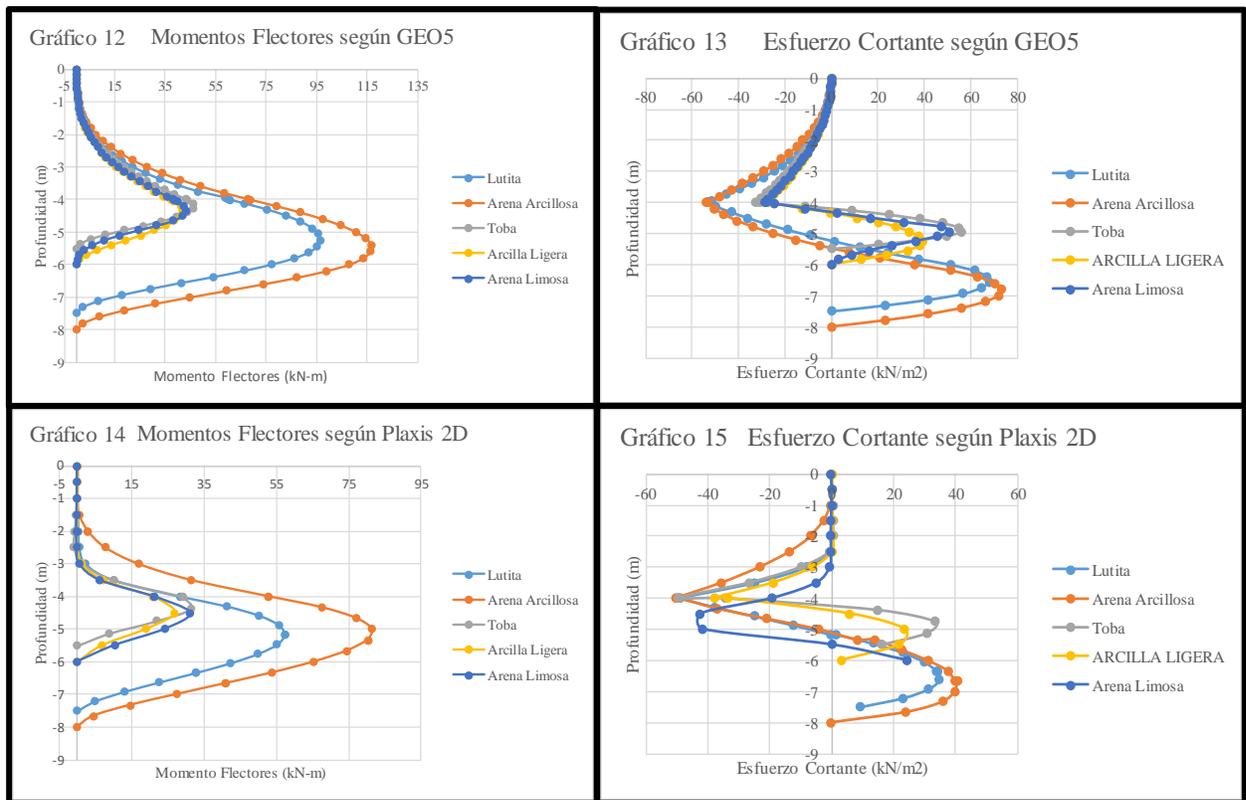


**Figura 30. Gráfico de momentos flectores y esfuerzo cortante según el tipo de suelo.**



**Figura 31. Gráfico de momentos flectores y esfuerzo cortante según el tipo de suelo.**

En los gráficos del 12 – 15, se observa el comportamiento de los muros pantalla de pilotes con cada tipo de suelo analizado, separados por el tipo de metodología utilizada. El material de toba es el que tiene mejor resistencia, de los cinco estratos analizados, por lo que se refleja en los esfuerzos internos del elemento estructural, los momentos flectores y esfuerzo cortantes son menores, al igual que la longitud mínima del pilote, cuando es analizado con este tipo de estrato de suelo. Comparando la toba, con el estrato de suelo más desfavorable, en este caso, es la arena arcillosa, se obtiene un momento flector mayor a un 60%, que el momento flector máximo obtenido del análisis del modelo con el estrato de toba, bajo las mismas condiciones de carga y altura de excavación.



**Figura 32. Comportamiento de muros pantallas de pilotes.**

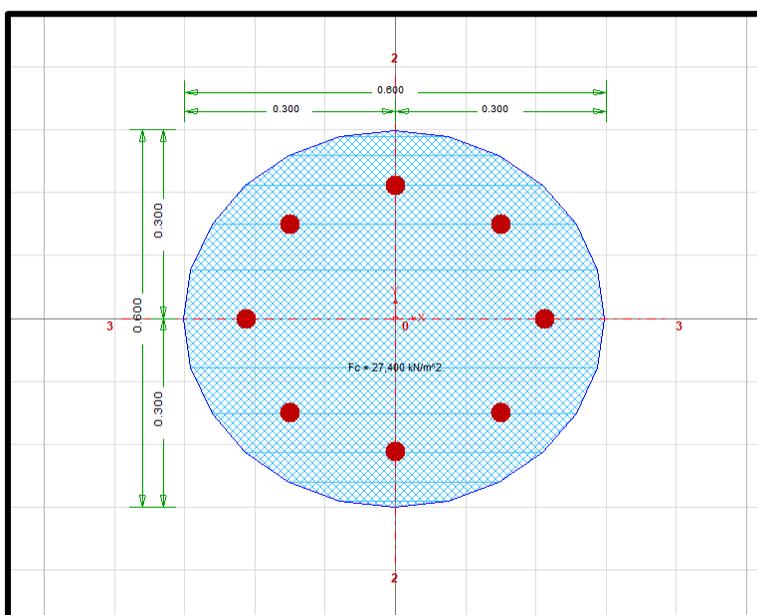
Luego de obtener las fuerzas internas del elemento estructural, y comprobar que con la profundidad establecida la pantalla no sufre deformaciones mayores de lo permisibles (1 pulgada), se precede al diseño estructural del elemento, en el cual el diámetro y refuerzo del pilote puedan ser capaces de soportar las cargas internas a la cual está sometido.

Utilizando los lineamientos de refuerzo que estipula AASHTO (5.7.4.2), en el cual especifica un rango, para la cantidad de refuerzo de acero permitido en la sección transversal de un pilote perforado. El área máxima permitida de acero de refuerzo longitudinal,  $A_s$ , es del 8,0% del área bruta.

$$\frac{A_s}{A_g} \leq 0.08$$

### Caso 1: Arena Limosa:

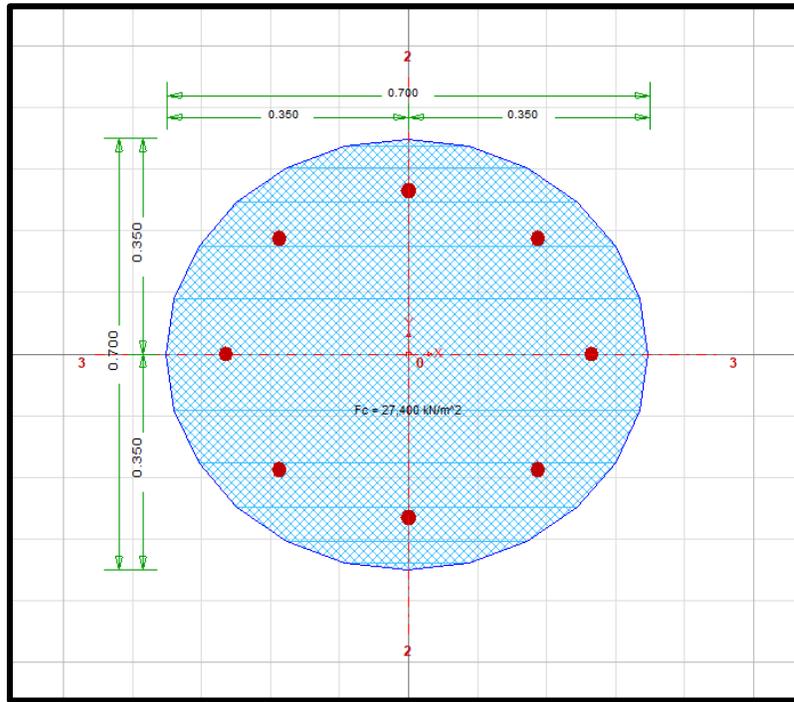
Para este tipo de estrato el diseño es el siguiente, se utilizarán pilotes con un diámetro de 0.60 metros, con un armado de 8 barras #8, con estribos #3 a cada 30 cm. Para efectos de evaluar los desplazamientos, se utilizaron combinaciones de carga en servicio (cargas no mayoradas) y para evaluar los esfuerzos de estabilidad interna de los componentes estructurales, se utilizaron combinaciones de carga última, por lo que las cargas se efectuaron con coeficientes como los que indican los reglamentos de construcción.



### Caso 2: Arena Arcillosa:

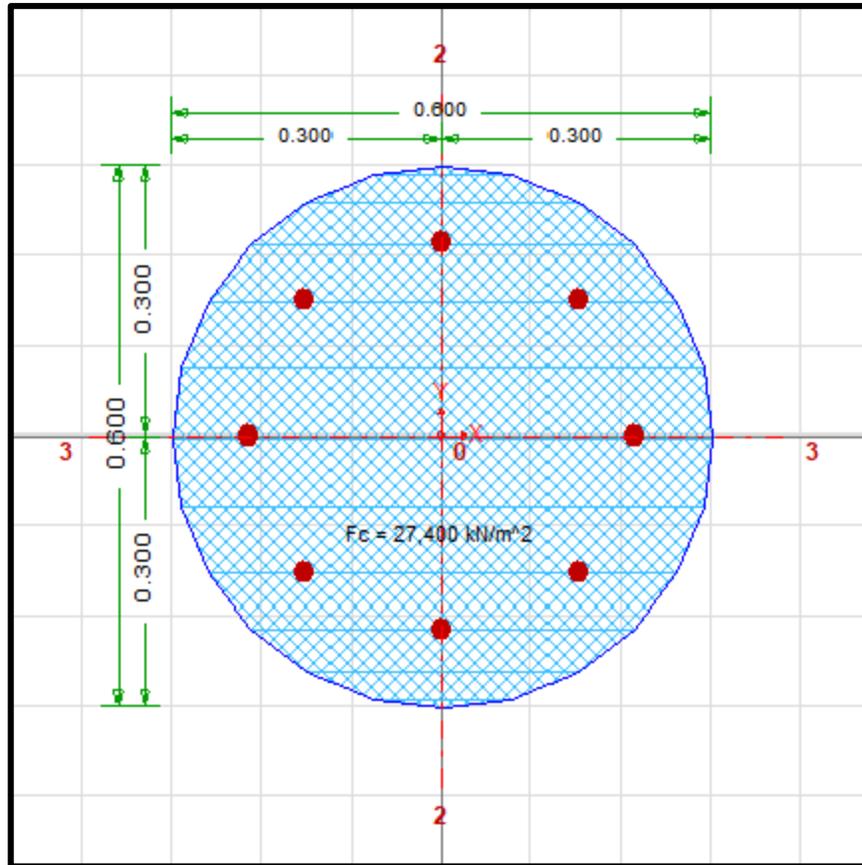
Para este tipo de estrato el diseño es el siguiente, se utilizarán pilotes con un diámetro de 0.70 metros, con un armado de 8 barras #6, con estribos #3 a cada 30 cm. Para efectos de evaluar los desplazamientos, se utilizaron combinaciones de carga en servicio (cargas no mayoradas) y para evaluar los esfuerzos de estabilidad interna de los componentes estructurales, se utilizaron

combinaciones de carga última, por lo que las cargas se efectuaron con coeficientes como los que indican los reglamentos de construcción.



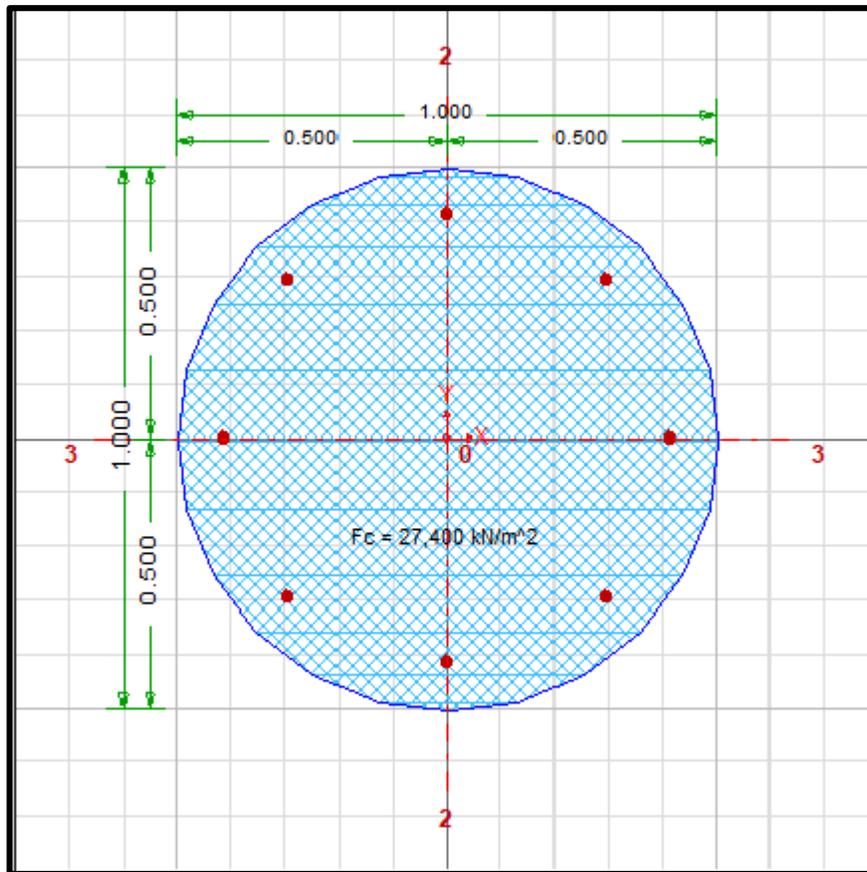
### Caso 3: Arcilla Ligera:

Para este tipo de estrato el diseño es el siguiente, se utilizarán pilotes con un diámetro de 0.60 metros, con un armado de 8 barras #6, con estribos #3 a cada 30 cm. Para efectos de evaluar los desplazamientos, se utilizaron combinaciones de carga en servicio (cargas no mayoradas) y para evaluar los esfuerzos de estabilidad interna de los componentes estructurales, se utilizaron combinaciones de carga última, por lo que las cargas se efectuaron con coeficientes como los que indican los reglamentos de construcción.



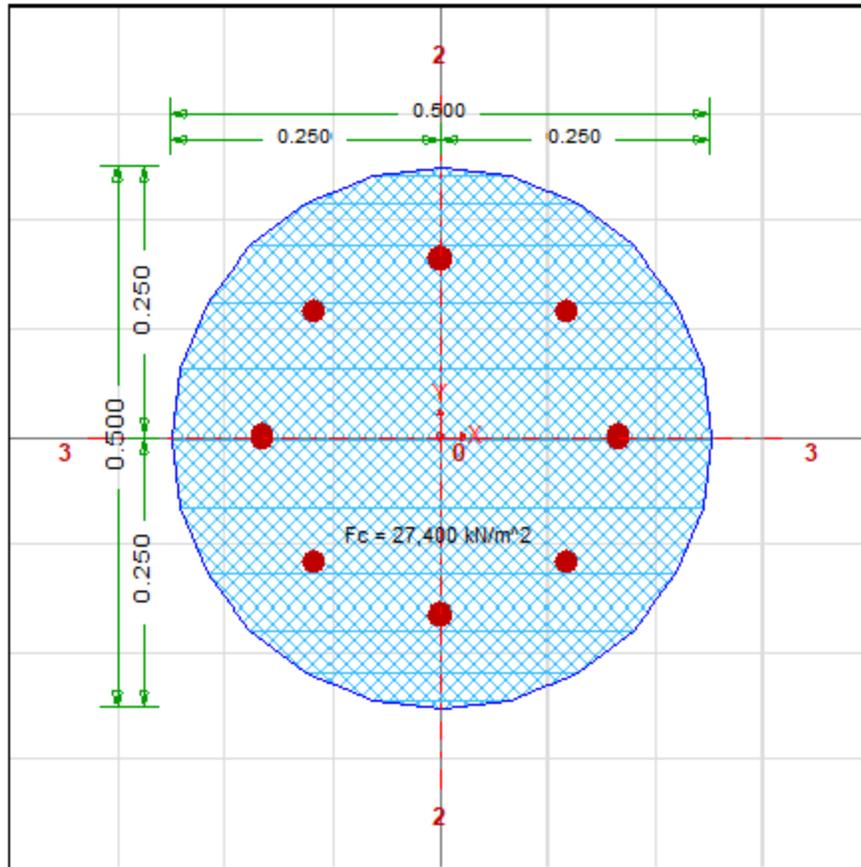
#### Caso 4: Lutita:

Para este tipo de estrato el diseño es el siguiente, se utilizarán pilotes con un diámetro de 1.00 metros, con un armado de 8 barras #6, con estribos #3 a cada 30 cm. Para efectos de evaluar los desplazamientos, se utilizaron combinaciones de carga en servicio (cargas no mayoradas) y para evaluar los esfuerzos de estabilidad interna de los componentes estructurales, se utilizaron combinaciones de carga última, por lo que las cargas se efectuaron con coeficientes como los que indican los reglamentos de construcción.



#### Caso 5: Toba:

Para este tipo de estrato el diseño es el siguiente, se utilizarán pilotes con un diámetro de 1.00 metros, con un armado de 8 barras #6, con estribos #3 a cada 30 cm. Para efectos de evaluar los desplazamientos, se utilizaron combinaciones de carga en servicio (cargas no mayoradas) y para evaluar los esfuerzos de estabilidad interna de los componentes estructurales, se utilizaron combinaciones de carga última, por lo que las cargas se efectuaron con coeficientes como los que indican los reglamentos de construcción.



#### 4.6 Análisis Comparativo en base a Costos

Para realizar el análisis de costos unitarios, se realizó fichas de costos unitarios, teniendo estas fichas como unidad base metro cubico las fichas utilizadas fueron de excavación estructural, muro de mampostería, muro de concreto armado, estas extraídas de la base de datos del Fondo Hondureño de Inversión Social (FHIS), Se utilizaron las especificaciones técnicas del Fondo Hondureño de Inversión Social para realizar una memoria de cálculo, por último la ficha de costo del pilote de concreto al igual que la especificación técnica fueron suministradas por parte de la empresa ASP.

Para la memoria de cálculo, se manejó la profundidad de ocho metros y un metro de ancho, variando el área de corte longitudinal del muro de mampostería y el muro de concreto reforzado, en el caso del pilote de concreto su corte transversal conserva un metro de diámetro y ocho metros de profundidad al igual que los muros de mampostería y el muro de concreto reforzado.

En el caso de las excavaciones estructurales que son contempladas para el muro de mampostería y muro de concreto reforzado, se multiplico la profundidad de la excavación por el ancho de la base, así de esta manera se obtuvo el área transversal en metros cuadrado, seguidamente se multiplico por la longitud de un metro, está funcionando de multiplicador, base longitudinal, para obtener la cantidad de metros cúbicos, con los cuales ya se puede presupuestar con las fichas del Fondo Hondureño de Inversión Social.

Para el muro de mampostería se calcularon las área, de las secciones transversales que conforman, la forma geométrica del muro para obtener la cantidad total de metros cuadrado seguidamente se multiplico por la longitud de un metro, está funcionando de multiplicador base longitudinal, para obtener la cantidad de metros cúbicos, de igual manera se realizó para el muro de concreto reforzado, con estos volúmenes se puede presupuestar con las fichas del Fondo Hondureño de Inversión Social.

En el caso del pilote de concreto, se calculó el área del círculo basado en un metro de diámetro, este metro de diámetro funciono como multiplicador base longitudinal restando multiplicar la profundidad del pilote que al igual que los muros de retención es de ocho metros.

Toda la memoria de cálculo se adjunta en anexos, de la investigación, a continuación se presenta el valor de las fichas de costo.

**Tabla 8. Ficha de costo para muro de mampostería.**

FICHA MURO DE MAMPOSTERÍA						
UNIDAD: m <sup>3</sup>						
FICHA:		F021005		ÍTEM:		124
ÍTEM	CONCEPTO	UNIDAD	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
MATERIALES						
1.0	CEMENTO GRIS TIPO PORTLAND	BOLSA	4.11	196.00	L	805.95
2.0	ARENA DE RIO LAVADA	m <sup>3</sup>	0.30	550.00	L	164.45
3.0	PIEDRA RIPION	m <sup>3</sup>	1.30	650.00	L	845.00
4.0	AGUA	m <sup>3</sup>	0.10	4.05	L	0.41
5.0	CLAVOS	LB	0.04	25.00	L	1.10
6.0	TUBO DE PVC DE 3" X 20' RD-41	LANCE	0.17	98.00	L	16.37
7.0	MADERA RUSTICA DE PINO	PIE T	1.10	18.50	L	20.35
SUB-TOTAL					L	1,853.63
MANO DE OBRA						
8.0	ALBAÑIL	JRD	0.50	450.00	L	225.00
9.0	PEÓN	JRD	0.50	350.00	L	175.00
SUB-TOTAL					L	400.00
EQUIPO						
10.0	HERRAMIENTA MENOR	%	0.04		L	0.16
SUB-TOTAL					L	0.16
TOTAL					L	2,253.79

**Ficha de Costo del Fondo Hondureño de Inversión Social**

**Tabla 9. Ficha de costo para muro de concreto reforzado.**

FICHA MURO DE CONCRETO REFORZADO						
UNIDAD: m <sup>3</sup>						
FICHA:		IC00004		ÍTEM:		455
ÍTEM	CONCEPTO	UNIDAD	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
MATERIALES						
1.0	CONCRETO DE 4,000 LBS/PLG2	m <sup>3</sup>	1.00	4000.00	L	4,000.00
2.0	ALAMBRE DE AMARRE	LB	1.27	12.00	L	15.24
3.0	VARILLA DE HIERRO CORRUGADO DE 1/2"	LANCE	0.82	175.00	L	143.50
4.0	VARILLA DE HIERRO CORRUGADO DE 1"	LANCE	4.21	210.00	L	883.47
5.0	CLAVOS DE 1" A 3".	LB	1.34	12.00	L	16.08
6.0	VARILLA DE HIERRO CORRUGADO DE 5/8"	LANCE	1.22	25.00	L	30.50
7.0	MADERA RUSTICA DE PINO	PIE T	22.25	18.50	L	411.63
SUB-TOTAL						L 5,500.42
MANO DE OBRA						
8.0	ALBAÑIL	JRD	0.06	450.00	L	27.00
9.0	PEÓN	JRD	0.70	350.00	L	245.00
10.0	ARMADOR DE HIERRO	JRD	0.40	450.00	L	180.00
11.0	AYUDANTE	JRD	0.70	350.00	L	245.00
12.0	CARPINTERO	JRD	0.40	450.00	L	180.00
SUB-TOTAL						L 877.00
EQUIPO						
12.0	HERRAMIENTA MENOR	%	0.04		L	0.35
SUB-TOTAL						L 0.35
TOTAL						L 6,377.77

**Ficha de Costo del Fondo Hondureño de Inversión Social**

**Tabla 10. Ficha de excavación estructural.**

FICHA EXCAVACIÓN ESTRUCTURAL						
UNIDAD: m <sup>3</sup>						
FICHA:		F014002		ÍTEM:		85
ÍTEM	CONCEPTO	UNIDAD	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
MATERIALES						
1.0	CLAVOS	LB	0.48	25.00	L	12.05
2.0	MADERA RUSTICA DE PINO	PIE T	12.10	18.50	L	223.85
SUB-TOTAL						L 235.90
MANO DE OBRA						
3.0	PEÓN	JRD	1.13	350.00	L	393.75
SUB-TOTAL						L 393.75
EQUIPO						
4.0	HERRAMIENTA MENOR	%	0.10		L	0.39
SUB-TOTAL						L 0.39
TOTAL						L 630.04

## Ficha de Costo del Fondo Hondureño de Inversión Social

**FICHA DE PILOTE DE CONCRETO DE 1.00 m. DE DIÁMETRO CON 8#8 Y #4 @ 15.00 CM.**  
**UNIDAD: m<sup>3</sup>.**

ÍTEM	CONCEPTO	UNIDAD	RENDIMIENTO	PRECIO UNITARIO	TOTAL	
MATERIALES						
1.0	CONCRETO f'c: 6000 psi.	m <sup>3</sup>	1.00	6000.00	L	6,000.00
2.0	ALAMBRE DE AMARRE	LB	1.27	12.00	L	15.24
3.0	ACERO DE REFUERZO 8#8@45.62°	LANCE	0.88	210.00	L	184.80
4.0	ACERO DE REFUERZO #4@15.00 cm.	LANCE	0.47	140.00	L	65.80
SUB-TOTAL					L	6,265.84
MANO DE OBRA						
5.0	ALBAÑIL	JRD	0.33	450.00	L	148.50
6.0	PEÓN	JRD	0.87	350.00	L	304.50
7.0	ARMADOR DE ACERO	JRD	0.90	450.00	L	405.00
SUB-TOTAL					L	858.00
EQUIPO						
8.0	HERRAMIENTA MENOR	%	9.00	858.00	L	77.22
9.0	EXCAVADORA TALADRO PARA PILOTES	DÍA	0.11	2651.00	L	291.61
SUB-TOTAL					L	368.83
TOTAL					L	7,492.67

**Tabla 11. Ficha de pilote de concreto**

## Ficha de Costo del Fondo Hondureño de Inversión Social

Se observa que los sistemas de muros pantallas de pilotes tienen un costo mayor, en comparación a un muro de mampostería, esto debido a que se utiliza maquinaria y personal especializado para la perforación y ejecución de los pilotes. En cuanto al costo en relación con el muro de concreto reforzados es menor, debido a que el volumen del muro de concreto reforzado es mucho mayor en comparación al muro pantalla de pilotes.

Para apreciar el análisis de costo utilizando las fichas con la unidad de metros cúbicos, y tendiendo en este caso comparativo la misma profundidad de ocho metros y el mismo metro longitud, los muros de mampostería y muro de concreto reforzado se agregó la excavación estructural en

cambio la ficha del pilote incluye la excavación realizada con piloteadora, ficha suministrada por la empresa ASP.

Las dimensiones del pilote corresponden a las exigencias más desfavorables de los análisis previamente realizados y las dimensiones del muro de mampostería y de concreto reforzado cumplen con la comparación geométrica de los pilotes extendiendo la profundidad a los ochos metros así como se le exige a los pilotes.

**Tabla 12. Comparativo de valor**

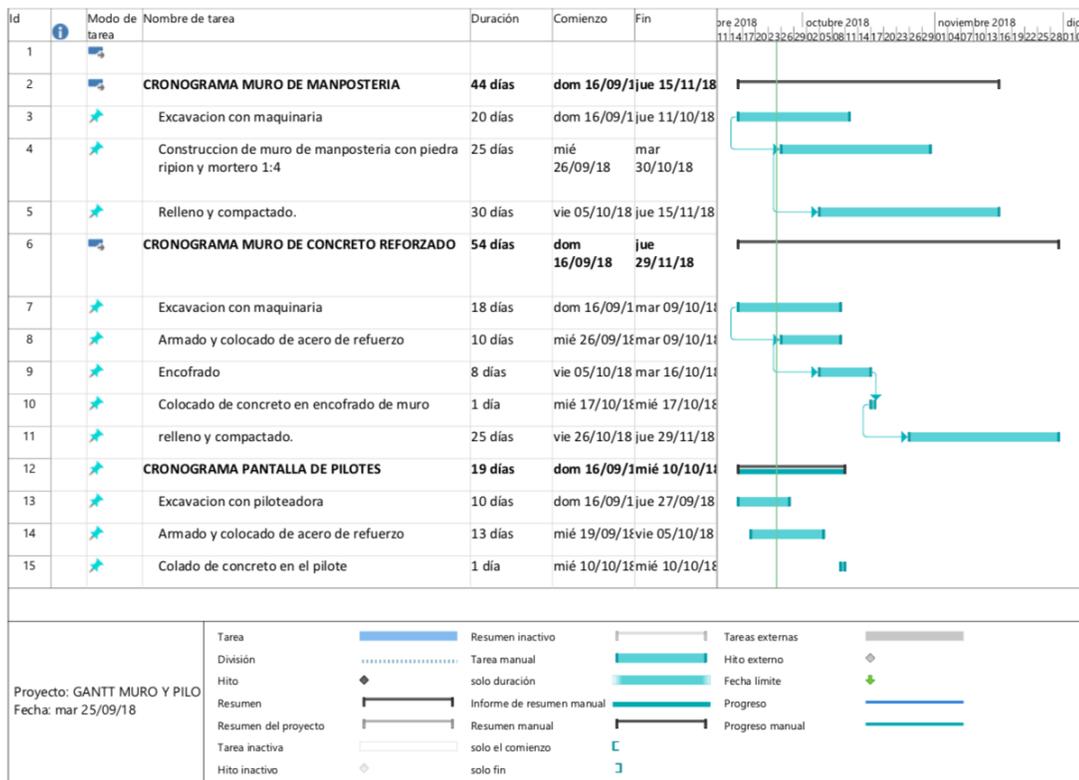
ÍTEM	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
<b>MURO DE MAMPOSTERÍA</b>					
A1	EXCAVACIÓN ESTRUCTURAL PARA MURO DE MAMPOSTERÍA.	m <sup>3</sup> .	32.00	L 630.04	L 20,161.40
A2	MURO DE MAMPOSTERÍA DE 8.00 m. DE ALTURA Y 4.00 m. DE BASE.	m <sup>3</sup> .	25.00	L 2,253.79	L 56,344.68
A3	TOTAL DE UN METRO LINEAL DE MURO DE MAMPOSTERÍA				L 76,506.08
<b>MURO DE CONCRETO REFORZADO</b>					
B1	EXCAVACIÓN ESTRUCTURAL PARA MURO DE CONCRETO REFORZADO.	m <sup>3</sup> .	32.00	L 630.04	L 20,161.40
B2	MURO DE CONCRETO REFORZADO DE 8.00 m. DE ALTURA Y 4.00 m. DE BASE.	m <sup>3</sup> .	6.40	L 6,377.77	L 40,817.70
B3	TOTAL DE UN METRO LINEAL DE MURO DE CONCRETO				L 60,979.10
<b>PILOTE DE CONCRETO</b>					
C1	PILOTE DE CONCRETO DE 1.00 m. DE DIAMETRO Y 8.00 m. DE ALTURA.	m <sup>3</sup> .	6.28	L 7,492.67	L 47,077.83
C2	TOTAL DE UN PILOTE POR METRO LINEAL				L 47,077.83

#### 4.6 Análisis Comparativo en cuanto al Tiempo

Otro aspecto por considerar en el análisis de un sistema de retención es el tiempo de ejecución de obra, y mucho más si los proyectos se ejecutan en bulevares o calles altamente transitadas.

En este punto los muros pantalla de pilotes son muy ventajosos por ser una solución, en la cual la perforación y ejecución de los pilotes es muy rápida, por lo que el proceso constructivo permite no interrumpir el tráfico, porque no se requiere realizar grandes excavaciones como en el caso de un muro de mampostería y un muro de concreto reforzado.

En la siguiente figura se puede apreciar los tiempos de ejecución de un muro pantalla de pilotes, un muro de mampostería y un muro de concreto reforzado, siendo la ejecución del muro pantalla mucho más rápida que un muro de mampostería.



**Figura 33. Cronograma de Ejecución de obra.**

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Este capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del proyecto, que resuelven las preguntas de investigación realizadas para solventar el problema de investigación.

### **5.1 Conclusiones**

1. La toba es la que presenta mejores condiciones de resistencia, por lo que las deformaciones y cargas internas en la pantalla son menores en comparación a los otros casos de estudio, esto se refleja en que la profundidad del pilote requiere menor longitud para que la estructura este estable. El pilote diseñado para este tipo de suelo es de 0.50 metros de diámetro, lo que reduce los costos de concreto y acero.
2. Debido a las condiciones geológicas de la zona de Tegucigalpa, la tipología de pilotes más viable y utilizada es la de pilotes perforados y colados in situ. De igual forma existe la disponibilidad de empresas especializadas que cuentan con maquinarias para realizar este tipo de estructuras.
3. El análisis de costo sobre las fichas del muro de concreto armado y el pilote, muestra que el pilote es más costoso por un 4.72% y con respecto al muro de mampostería es 16%, más económico, esto debido a las técnicas constructivas y materiales implementados.

### **5.2 Recomendaciones**

- 1 Revisar mediante un análisis de estabilidad global que la estructura es estable ante las cargas que esta impuesta y el corte de suelo realizado.
- 2 Verificar la maquinaria especializada en perforación de pilotes disponible en el medio y el tipo de suelo presente en el sitio, para determinar que tipología de pilotes se utilizará en el diseño.

- 3 Se recomienda en su totalidad, el uso de muros de pantallas de pilotes, como sistemas de retención, ya que es el más económico de los sistemas y el que presenta el mejor tiempo de ejecución.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askeland, D. & Phule, P. (2006), *The Science and Engineering of Materials*. Cengage. 198.
- AMERICAN INSTITUTE OF CONCRETE. (2014).
- ASHTO. (2014). LRFD Bridge Design.
- Braja M, Das. (2012). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones.
- Barreto Maya, A. P., GONZÁLEZ, Y. V., & RAMÍREZ, O. E. (2013). Evaluación Comparativa De La Capacidad De Carga En Cimentaciones Profundas. Formulas Analíticas Y Ensayos De Carga. *Boletín de Ciencias de La Tierra; Bogotá*, (33), 93-110.
- Código Hondureño de la Construcción. (2008)
- DIARIO OFICIAL LA GACETA. (2010).
- Donald P. Coduto. (2001), *Foundation Design Principles and Practices* .
- Fernandez Valdez, S. F. (2010). *Influencia de la rigidez a la flexión del pilote sobre las curvas P-Y de suelos arenosos*. University of Puerto Rico, Mayaguez (Puerto Rico).
- Gere J. & Goodno b. (2009). *Mecánica de materiales*.
- Martinez, Y. M. (2016). *ESTABILIZACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRAS MEDIANTE PILOTES*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- McCormac J. & Brown R., (2011). *Diseño de Concreto Reforzado*.
- Ortuño, I., & Murillo, T. (2010). Estabilización de taludes mediante pilotes.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (2011). *Ingeniería de Cimentaciones*.
- Rojo Pizarro, G. I. (2016). *ESTUDIO DE SISTEMAS DE SOSTENIMIENTO DE SUELO EN EXCAVACIONES EN EDIFICIOS*. Universidad de Chile.
- Sanhueza Plaza, C. X. (2008). *Criterios y Parámetros de Diseño para Pantallas Continuas en Madrid*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Saucedo, S. . (2010). APLICACIÓN DE MUROS DE PILOTES EN OBRAS VIALES EN LIMA,  
10.

Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Colombia.

Tomlinson, M. (2008). *Pile Design and Construction Practice* (5.<sup>a</sup> ed.).

Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (5.<sup>a</sup> ed.).

## ANEXOS

### Anexo 1. Instrumento de investigación: Encuesta

Somos estudiantes de Postgrado de la maestría en Ingeniería en Estructuras de la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC). Como parte de nuestro proyecto de graduación estamos realizando una breve encuesta para obtener información relacionada al comportamiento de pantalla de pilotes en cortes para túneles vehiculares para distintos tipos de suelos en Tegucigalpa. Agradecemos de antemano su colaboración.

1. ¿En qué empresa labora?
  - a.  Construcción
  - b.  Consultoría
  - c.  Diseño
  - d.  Supervisión
3. Otros \_\_\_\_\_
4. ¿Su empresa ha desarrollado proyectos en la Ciudad de Tegucigalpa?
  - a.  Si
  - b.  No

5. ¿Dentro de la experiencia que posee la empresa en que la Ud. se desempeña, ha estado involucrada en proyectos relacionados con muros pantallas de pilotes en la ciudad de Tegucigalpa?

- a.  Si
- b.  No

6. ¿Conoce usted algún método para el análisis y diseño de muros pantallas con pilotes? Si su respuesta es “NO”, pase a la pregunta 7.

- a.  Si
- b.  No

En caso de que su respuesta anterior fue positiva, mencione los métodos que conoce para el diseño de muros pantallas con pilotes.

---

7. ¿Qué metodología para estabilización de excavaciones para túneles es el más recomendado según su experiencia?

- a.  Muros de concreto reforzado
- b.  Muros de mampostería
- c.  Muros anclados.
- d.  Muros pantalla de pilotes
- e. Otros \_\_\_\_\_

8. ¿Qué determina la elección de la configuración de los pilotes tangentes, secantes o separados?

- a.  Tipo de suelo
- b.  Empujes de suelo actuantes

- c.  Nivel freático
- d.  Cargas
- e.  Todas las anteriores

9. ¿Mencione los procesos constructivos de perforación de pilotes que usted ha observado?

---

10. ¿Considera que el sistema de pantalla de pilotes es el más adecuado para la construcción de pasos vehiculares subterráneos? Justifique su respuesta.

- a.  Si
- b.  No

---

11. ¿Considera que las pantallas de pilotes como sistema de retención en túneles, es el más factible económicamente en comparación a otros sistemas? Justifique su respuesta.

- a.  Si
- b.  No

---

## **Anexo 2. Instrumento de investigación: Entrevista**

Entrevistado: Ing. Carlos Paz

Empresa: GEOTECNICA

1. Mencione su experiencia relacionada con pilotes, ya sea construcción, diseño o supervisión

R./ Pilotes para túneles en los que destaca, túnel del Bulevar Centro América, Jacaleapa, Lomas del Guijarro Sur, Col. 21 de octubre y experiencia en cimentaciones en edificios como Torre Aria, Torre Platinum y Ónix, en muros de contención, el de Ciudad del Ángel y ASJ.

2. ¿Con que tipología de pilotes ha tenido la oportunidad de desarrollar dentro de su experiencia profesional?

R. / Todos han sido perforados y colocados in situ, hincados en Tegucigalpa no hemos aplicado debido a su tipología de suelo, no es lo más conveniente.

3. ¿Cuáles son los aspectos geotécnicos que considera al momento del diseñar un muro pantalla de pilotes con el método de elementos finitos?

R. / Topografía, cargas, parámetros geotécnicos (cohesión, fricción, ángulos, peso), tipo de concreto (mínimo 4,000 psi.), tipo de armado (acero Grado 40-Grado 60), armado tipo espiral o en anillo todo depende si se requiere para carga o contención.

4. ¿De qué depende la longitud de empotramiento de los pilotes en un muro pantalla?

R. / Si fuese para contención depende del empuje del suelo utilizando una retenida o un anclaje en la cabeza tipo viga, desde el punto de vista de falla más probable, en túneles el

empotramiento por lo general anda alrededor de 1/3 de su altura, con la ventaja que normalmente en el tramo central está ubicada la rotonda, la cual funciona como arrostramiento para los pilotes, siempre se revisa el plano de falla más probable.

5. ¿Qué parámetros utiliza para el pre-dimensionamiento y espaciamiento de los pilotes?

R. / Normalmente son espaciados, aquí no se presentan del tipo tangente o secante, por lo general se utiliza desde el mínimo que son 10.00 cm de hasta dos veces el diámetro del pilote.

6. ¿Por qué considera que los sistemas de muros pantalla con pilotes están siendo utilizados en las obras viales de Tegucigalpa?

R. / Es una solución económica desde el punto de vista que es rápida, práctica y eficiente, ya que no interfiere el tráfico por lo que es poco invasivo.

Entrevistado: Ing. Daniel Sansur

Empresa: SAYBE Y ASOCIADOS

1. Mencione su experiencia relacionada con pilotes, ya sea construcción, diseño o supervisión

R. / Se ha trabajado con dos tipos de pilotes uno para cimentaciones profundas y la otra para muros de retención, cuando lo hemos utilizado en cimentaciones nos ha ayudado a evitar que las cimentaciones sean muy profundas cuando los suelos son muy malos ya que a través de los pilotes se transmiten los esfuerzos a los lechos de suelo con mejor capacidad soportante y hemos trabajado con pilotes por punta y por fricción.

Participé en el proyecto del túnel de Bulevar Centro América, se utilizaron 120 pilotes, en los cuales se realizó ambas combinaciones donde una parte se trabajó por punta que alcanzo la lutita y los otros por fricción.

2. ¿Con que tipología de pilotes ha tenido la oportunidad de desarrollar dentro de su experiencia profesional?

R. / Pilotes realizados in situ, donde se realiza la excavación con el taladro, se instala la canasta de acero de refuerzo y se cuela el concreto, en Tegucigalpa se podría traer pilotes hincados, pero el problema es la disponibilidad de un martillo para realizar el hincado, y este genera contaminación ambiental por ruido.

3. ¿Cuáles son los aspectos geotécnicos que considera al momento del diseñar un muro pantalla de pilotes con el método de elementos finitos?

R. / La capacidad de soporte de suelo, el nivel freático, ángulo de fricción y carga vehicular.

4. ¿De qué depende la longitud de empotramiento de los pilotes en un muro pantalla?

R. / Alrededor del 60% de la altura de la excavación, por ejemplo, si se tiene 7.00 m. de altura de excavación, 4.00 m. esta empotrado el pilote.

5. ¿Qué parámetros utiliza para el pre-dimensionamiento y espaciamiento de los pilotes?

R. / El espaciamiento entre pilotes, lo manejamos entre 1.00 - 1.50 m de centro a centro, depende del tipo de suelo, el espaciamiento entre pilote se instala una electro malla 4/4 y relleno con shotcrete, se utilizan barras de acero #10. El 1.5% del área del pilote es el área de acero mínima considerando la carga lateral para el diseño.

6. ¿Por qué considera que los sistemas de muros pantalla con pilotes están siendo utilizados en las obras viales de Tegucigalpa?

R./ Es el más conveniente, porque la excavación, la instalación del acero y colocado de concreto no abarca mucho espacio, caso contrario de un muro de concreto o un muro de mampostería, que realiza una gran excavación a cielo abierto, con dificultades de prevención de taludes ya que si no se calcula adecuadamente pueden fallar los taludes. Es más eficiente para los ingenieros en la construcción y para el público, ya que es más rápido como por ejemplo el túnel del Bulevar Centro América y el del Juan Pablo II, nunca se cerró el tráfico.

Entrevistado: Ing. Luz Marina Fúnez

Empresa: ASP

1. Mencione su experiencia relacionada con pilotes, ya sea construcción, diseño o supervisión

R. / Diseño de la pantalla de pilotes del paso a desnivel de la Colonia 21 de octubre, y se han supervisado otros.

2. ¿Con que tipología de pilotes ha tenido la oportunidad de desarrollar dentro de su experiencia profesional?

R. / En cuanto a la tipología, se han diseñado según a la disponibilidad de maquinaria del contratista.

3. ¿Cuáles son los aspectos geotécnicos que considera al momento del diseñar un muro pantalla de pilotes con el método de elementos finitos?

R. / Este es un trabajo realizado en equipo entre el ingeniero estructural y el ingeniero geotecnista, que van de la mano con la retroalimentación de cada uno.

4. ¿De qué depende la longitud de empotramiento de los pilotes en un muro pantalla?

R. / De igual forma son revisadas con el ingeniero geotecnista y es variable según la carga y la capacidad del suelo, según como se modele, si se modela como resorte o como un empotramiento. Es un trabajo en equipo.

5. ¿Qué parámetros utiliza para el pre-dimensionamiento y espaciamiento de los pilotes?

R. / Es basado según el proceso constructivo por el diámetro, si el pilote va anclado dependiendo de la perforadora que se va a utilizar, si requiere drenaje, se manejan diámetros promedio alrededor de un metro, en la pantalla de pilotes en túneles se ubica el pilote con la viga cabecera, al tener la excavación se manda a inspección, si no hay material flojo para la instalación del armado y colado del concreto.

6. ¿Por qué considera que los sistemas de muros pantalla con pilotes están siendo utilizados en las obras viales de Tegucigalpa?

R. / Una de las razones más importantes es que estamos en la ciudad ya que si fuera hincado las vibraciones ocasionadas por el martillo puede dañar las estructuras laterales por vibración, otra es la facilidad constructiva ya que no interfiere con el tráfico

Entrevistado: Ing. Fernando Gandour

Empresa: RODIO SWISSBORING

1. Mencione su experiencia relacionada con pilotes, ya sea construcción, diseño o supervisión

R. / Los pilotes tienen diferentes usos para cimentación, muros de retención, rehabilitación de taludes, a medida que han pasado los años, he visto como se han implementado en la ciudad, y son una muy buena solución, sobre todo para puentes.

2. ¿Con qué tipología de pilotes ha tenido la oportunidad de desarrollar dentro de su experiencia profesional?

R. / Tipos de pilotes, tenemos pilotes hincados, de madera, metálico, concreto y el otro tipo son los colados en sitio.

3. ¿Cuáles son los aspectos geotécnicos que considera al momento del diseñar un muro pantalla de pilotes con el método de elementos finitos?

R. / Tipología de suelos, en Tegucigalpa tenemos lulitas, tobas. Características de suelo, cohesión, resistencia del suelo, sondeo de penetración estándar, ángulo de fricción y que tenga una profundidad competente.

4. ¿De qué depende la longitud de empotramiento de los pilotes en un muro pantalla?

R. / Para determinar la longitud de empotramiento es necesario obtener un estudio de suelo, y las cargas a emplear. También está relacionada la capacidad del suelo, el diámetro del pilote.

5. ¿Qué parámetros utiliza para el pre-dimensionamiento y espaciamiento de los pilotes?

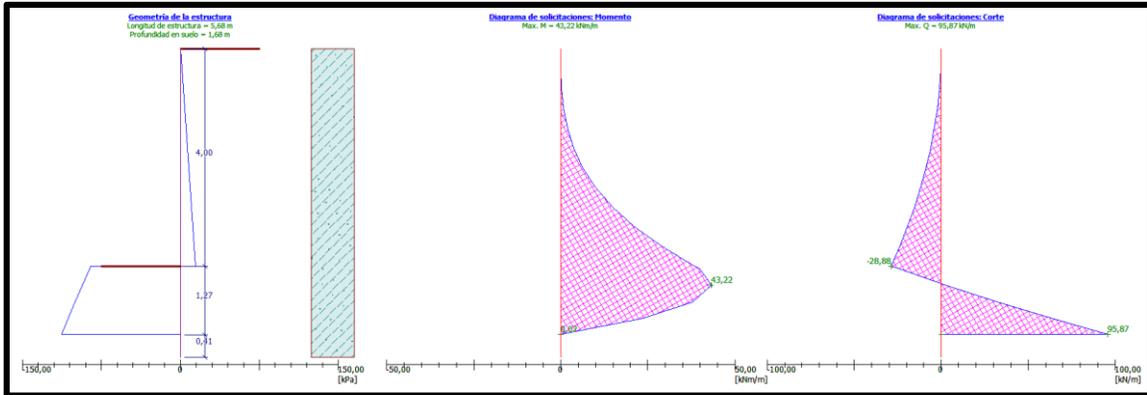
R. / También va relacionado de las cargas, y la mecánica de suelo

6. ¿Por qué considera que los sistemas de muros pantalla con pilotes están siendo utilizados en las obras viales de Tegucigalpa?

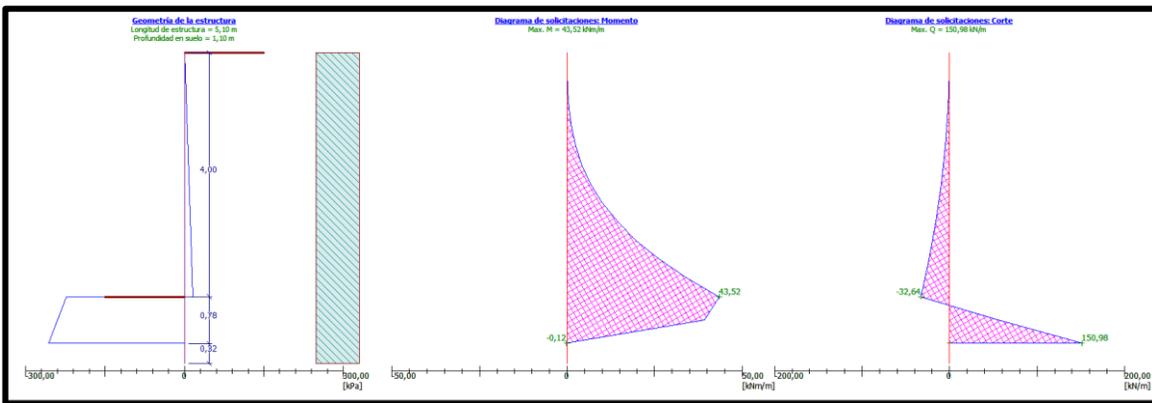
R. / Por la rapidez de ejecución y las ventajas constructivas que tiene estos sistemas.

### Anexo 3. Resultados obtenidos del Programa GEO5

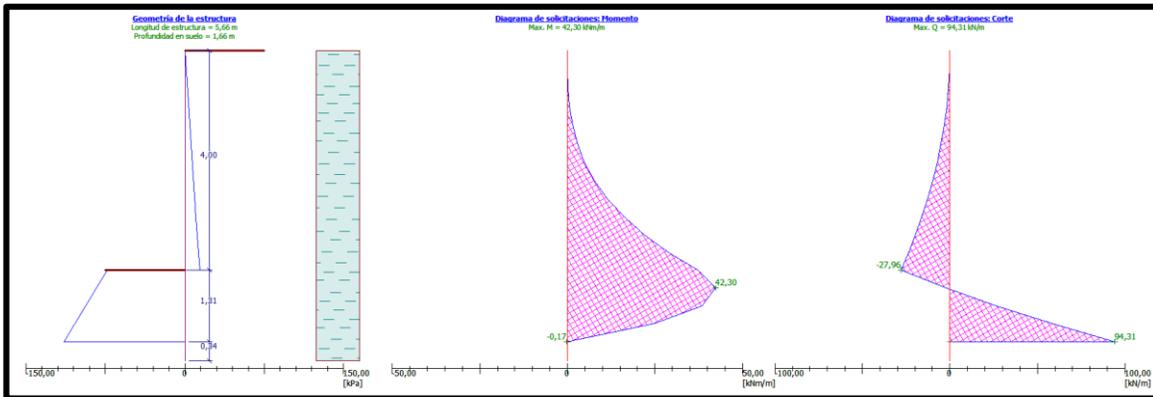
Curva de esfuerzo cortante y momentos para el estrato arena limosa, profundidad de empotramiento mínima 1.68m.



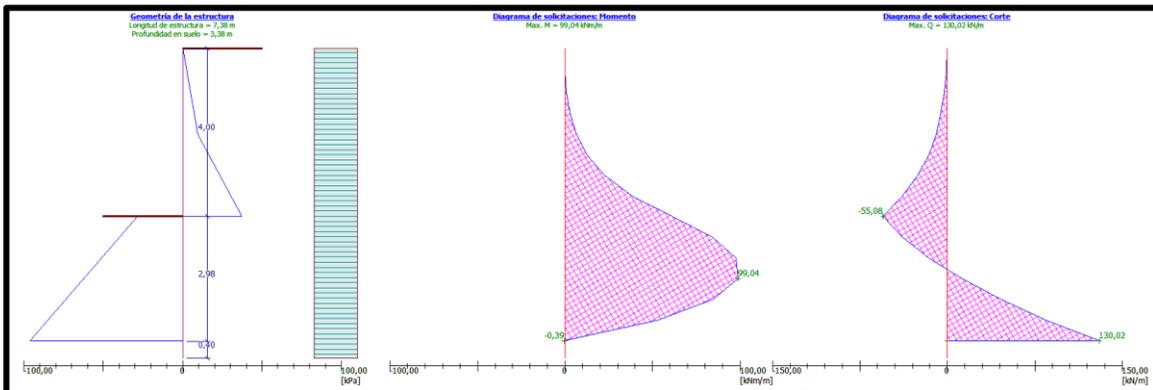
Curva de esfuerzo cortante y momentos para el estrato toba, profundidad de empotramiento mínima 1.10m



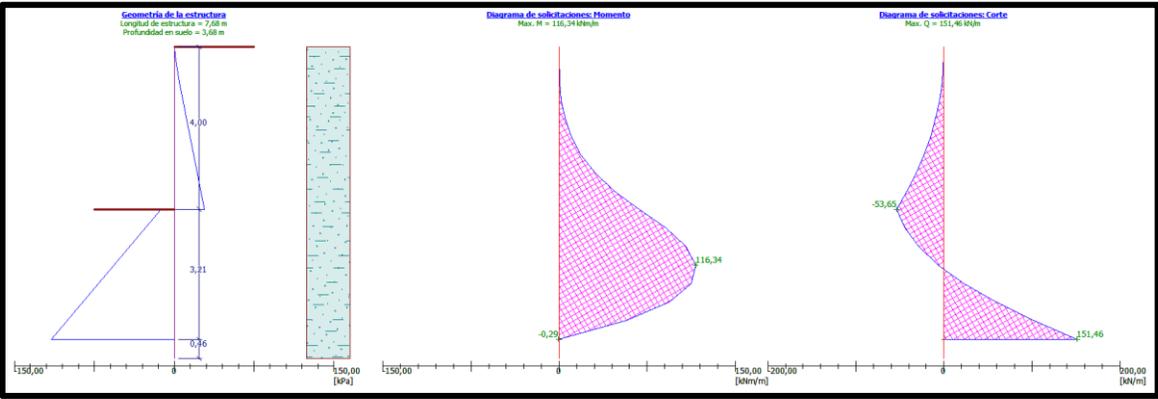
Curva de esfuerzo cortante y momentos para el estrato arcilla ligera, profundidad de empotramiento mínima 1.66m.



Curva de esfuerzo cortante y momentos para el estrato lutita, profundidad de empotramiento mínima 3.38m

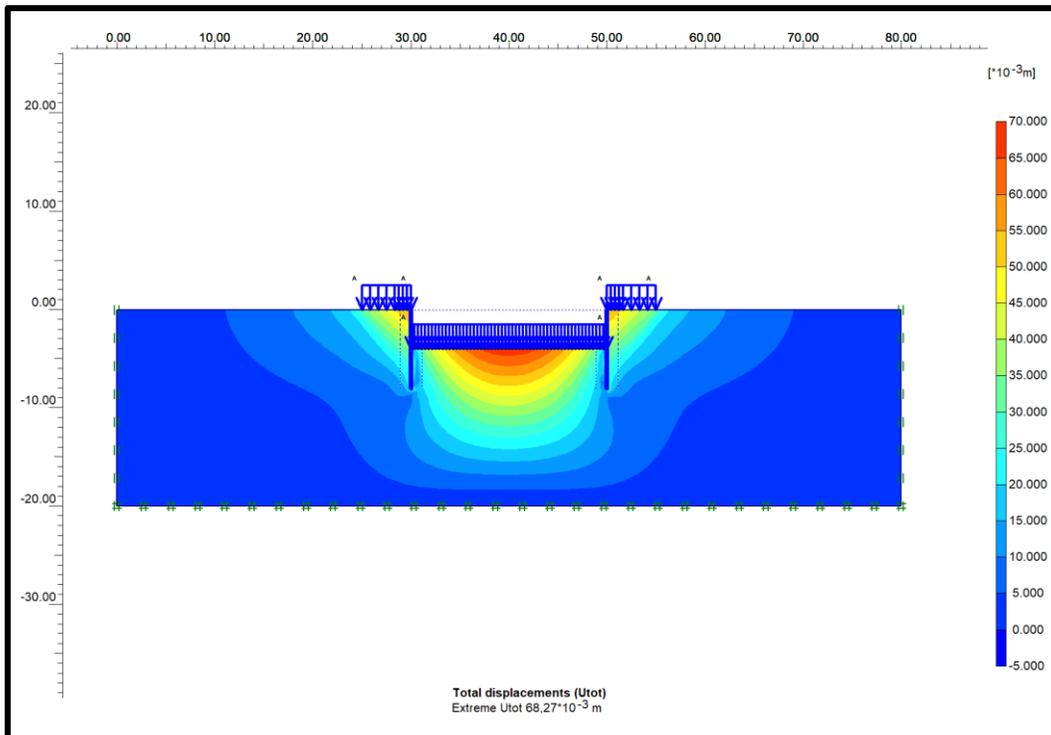
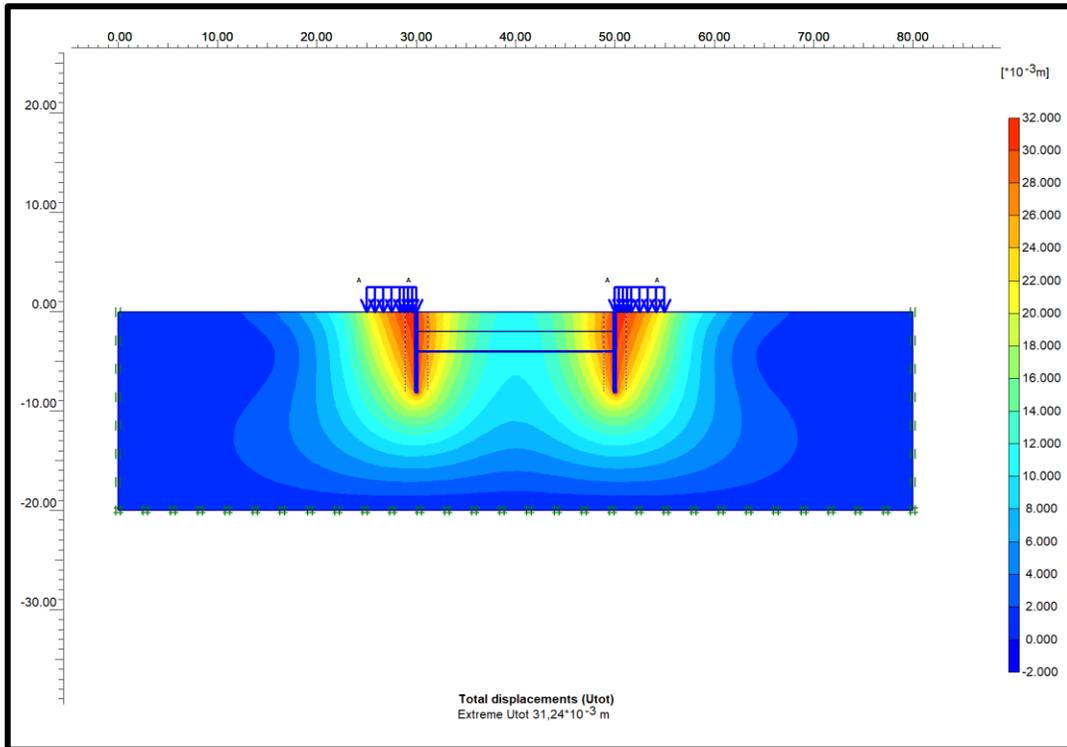


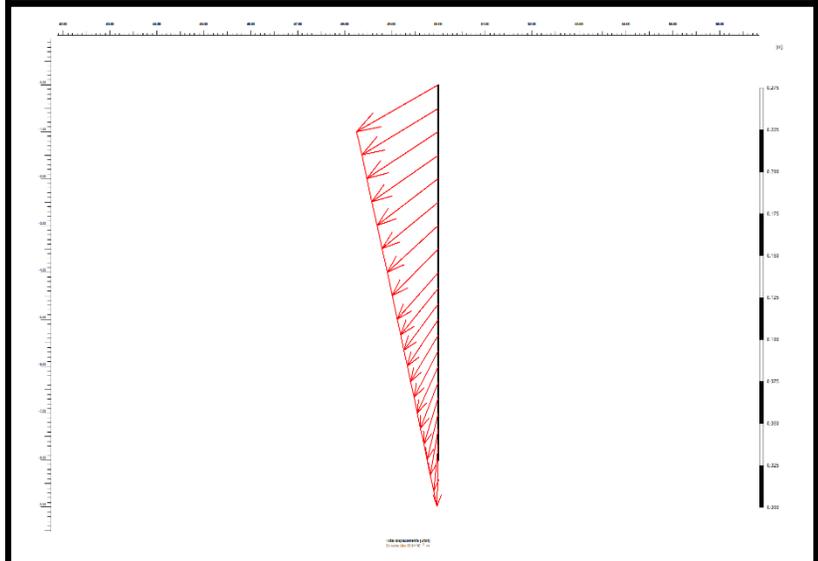
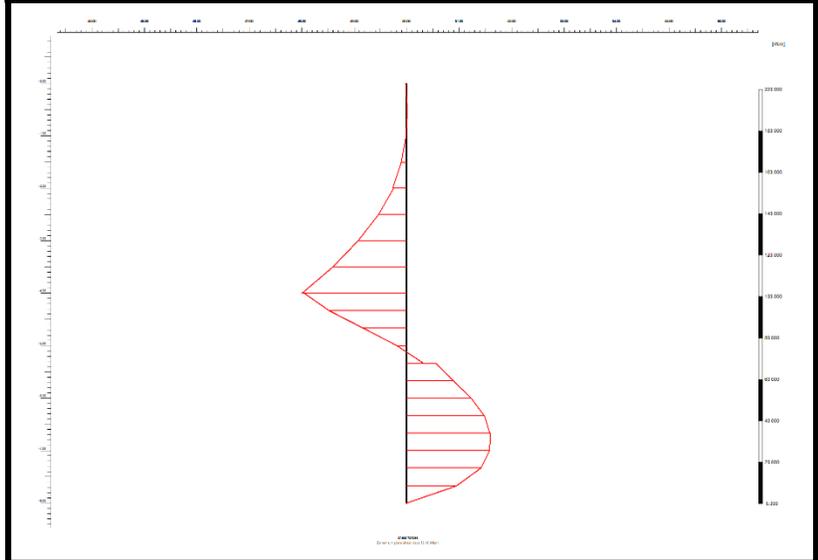
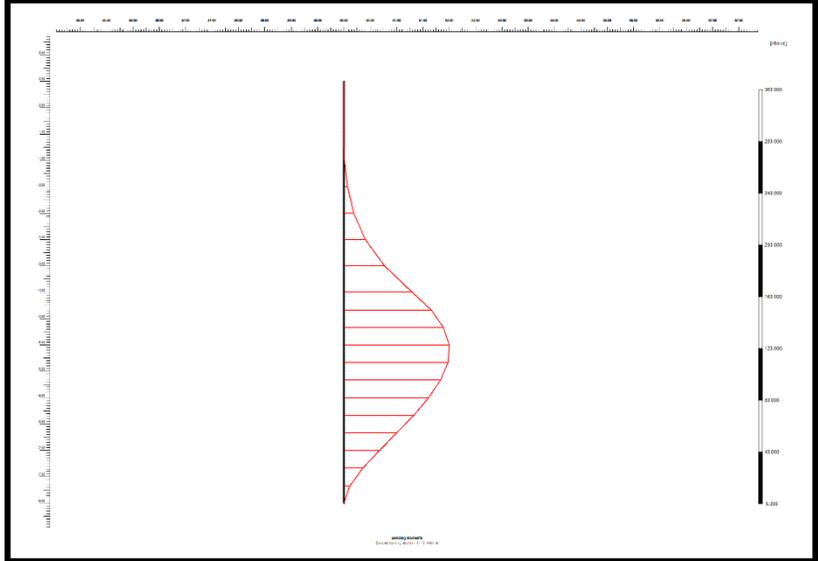
Curva de esfuerzo cortante y momentos para el estrato arena arcillosa, profundidad de empotramiento mínima 3.68m.



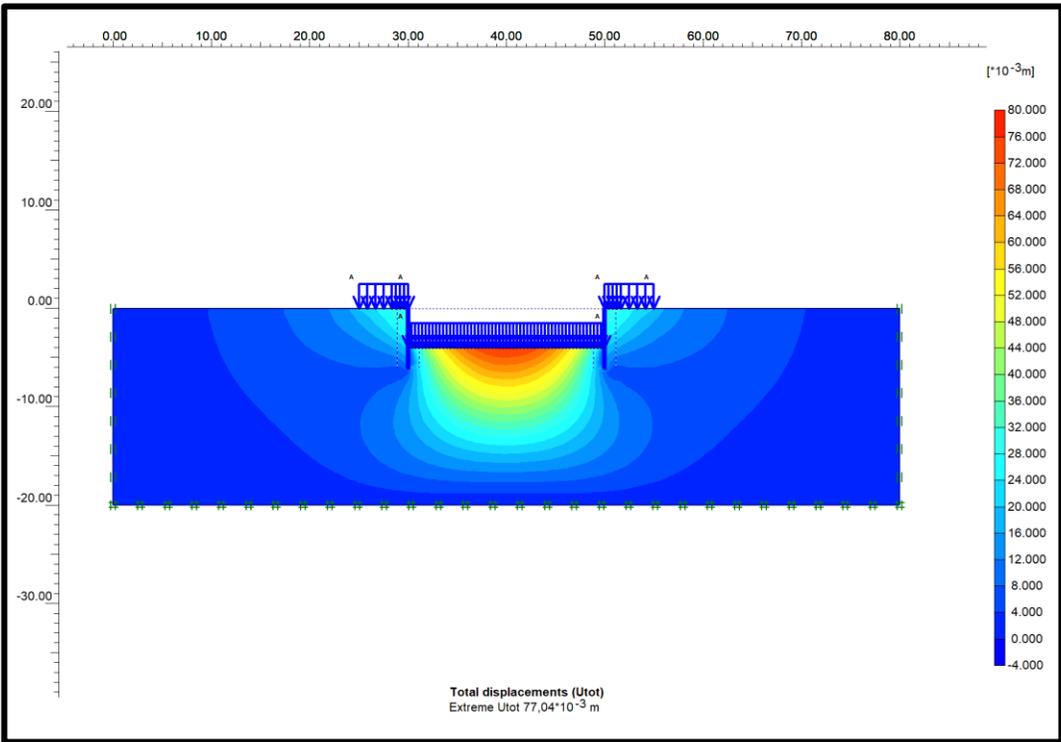
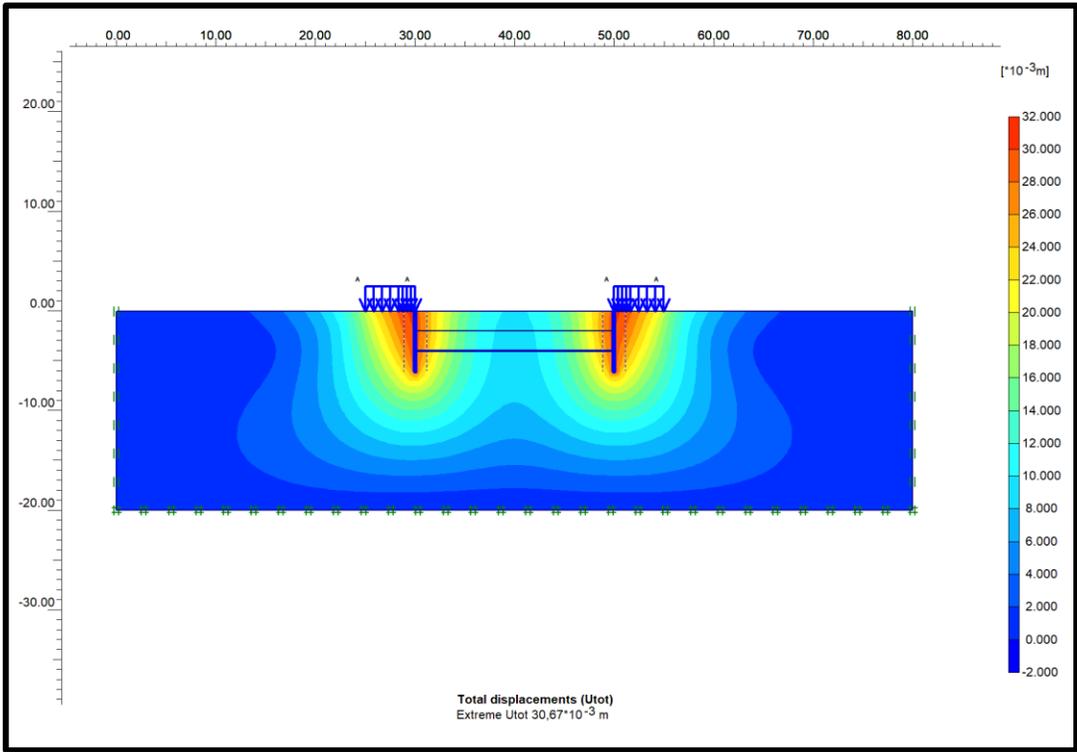
## Anexo 4. Resultados obtenidos del Programa Plaxis 2D.

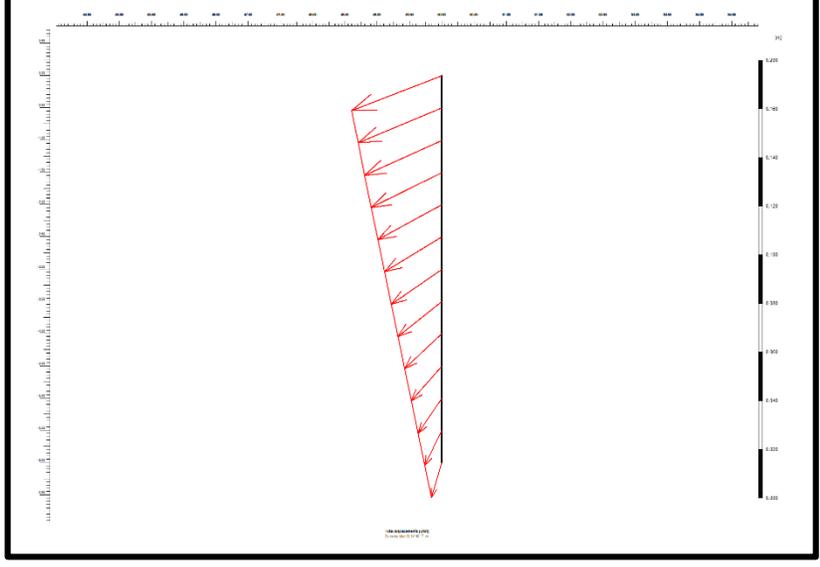
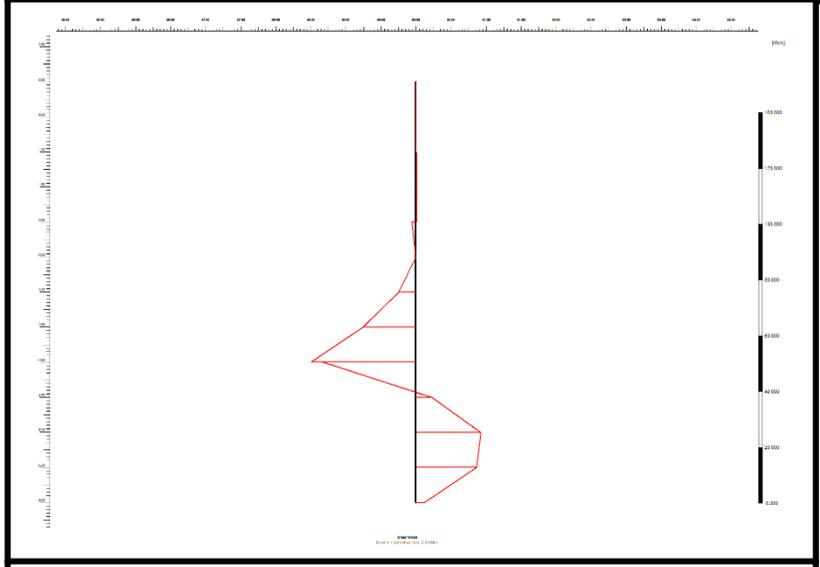
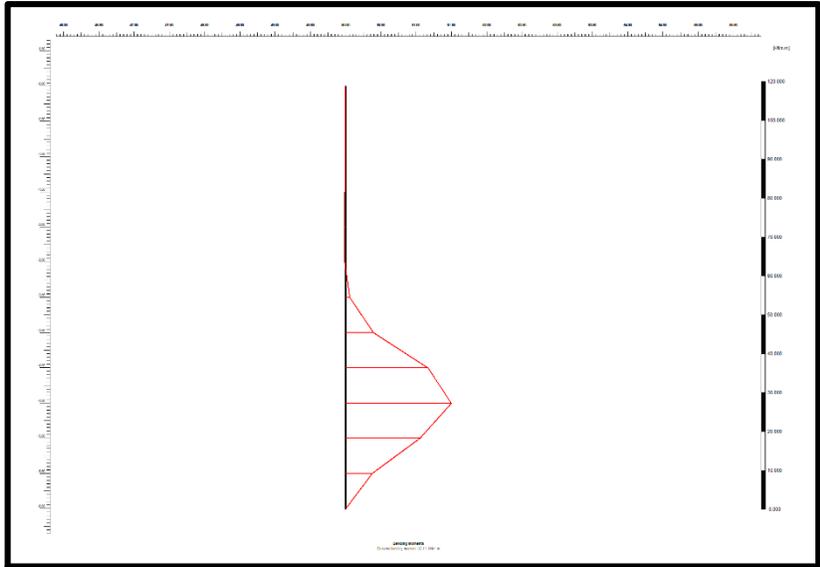
Modelo 2D con el estrato de arena arcillosa.



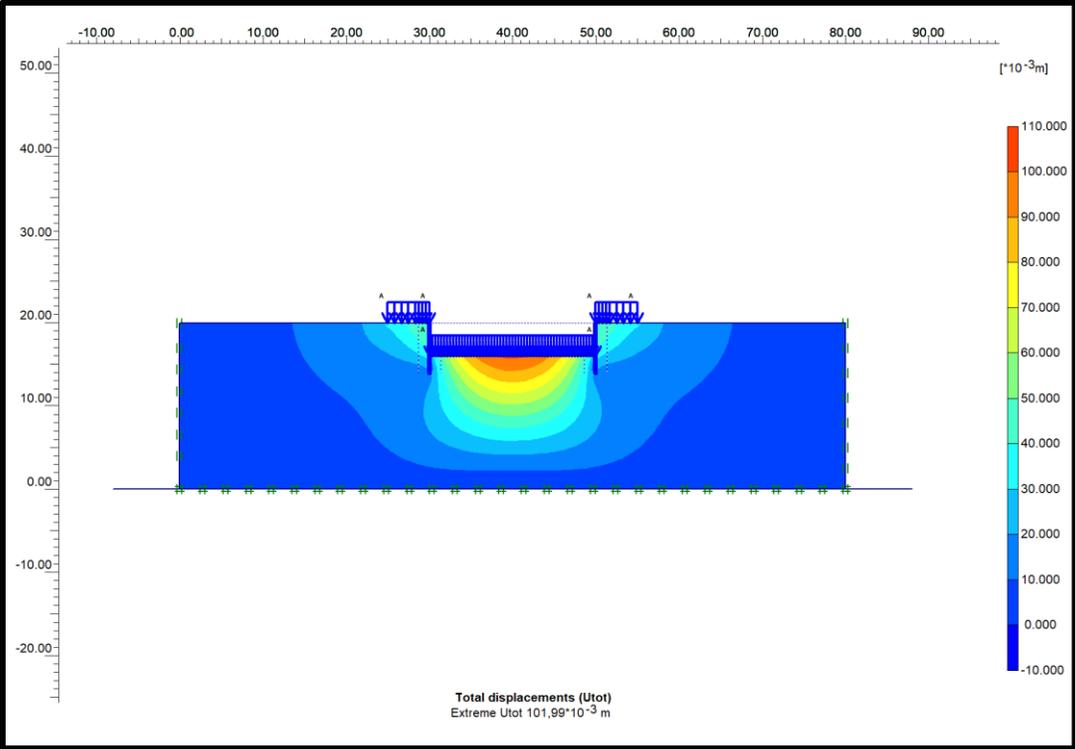
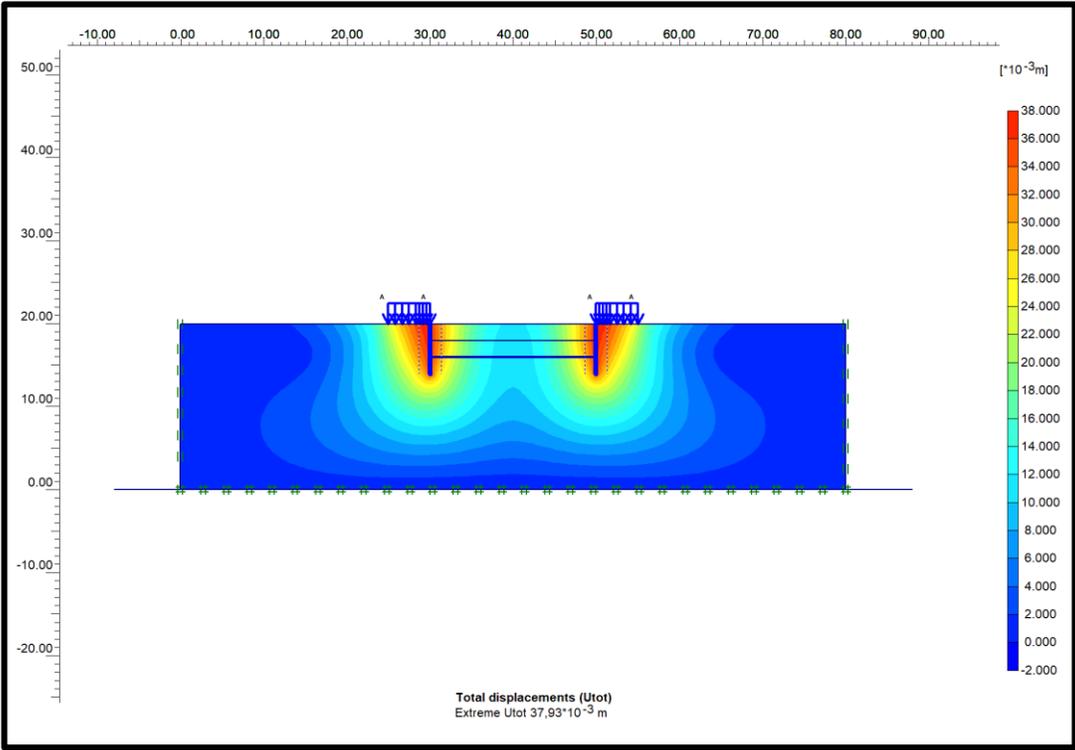


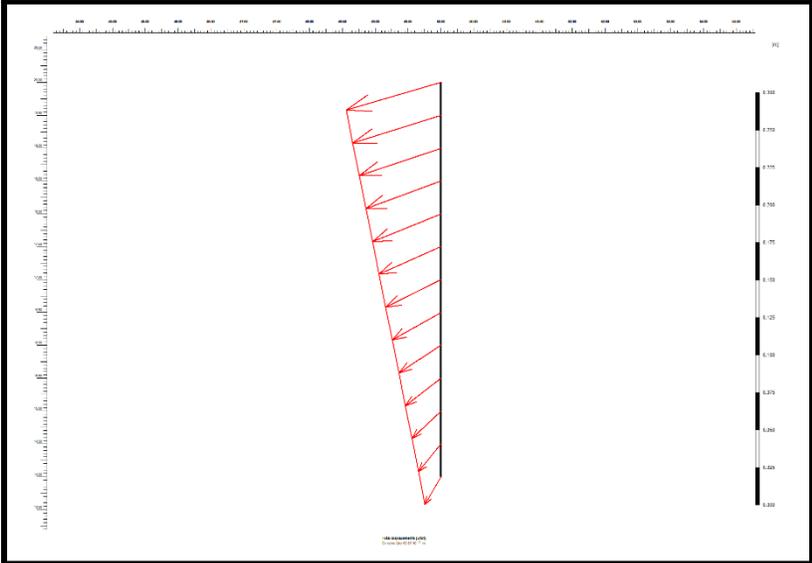
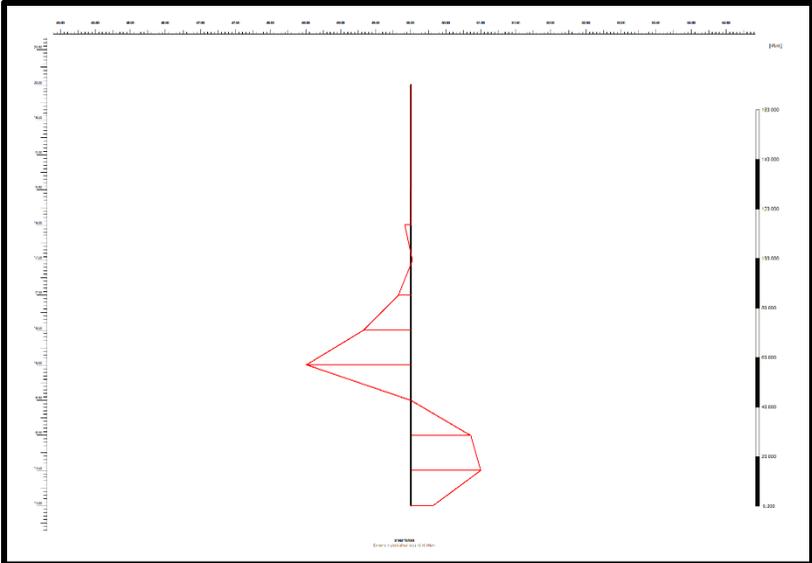
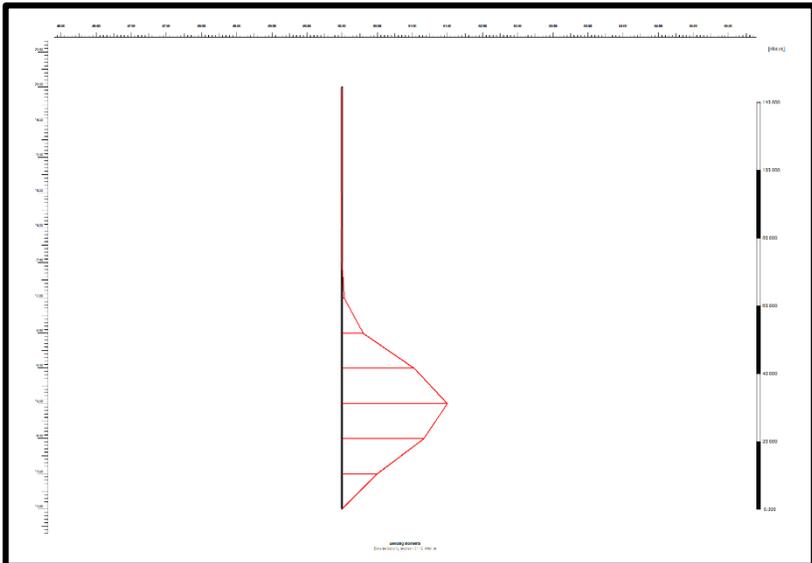
Modelo 2D con el estrato de arcilla ligera.



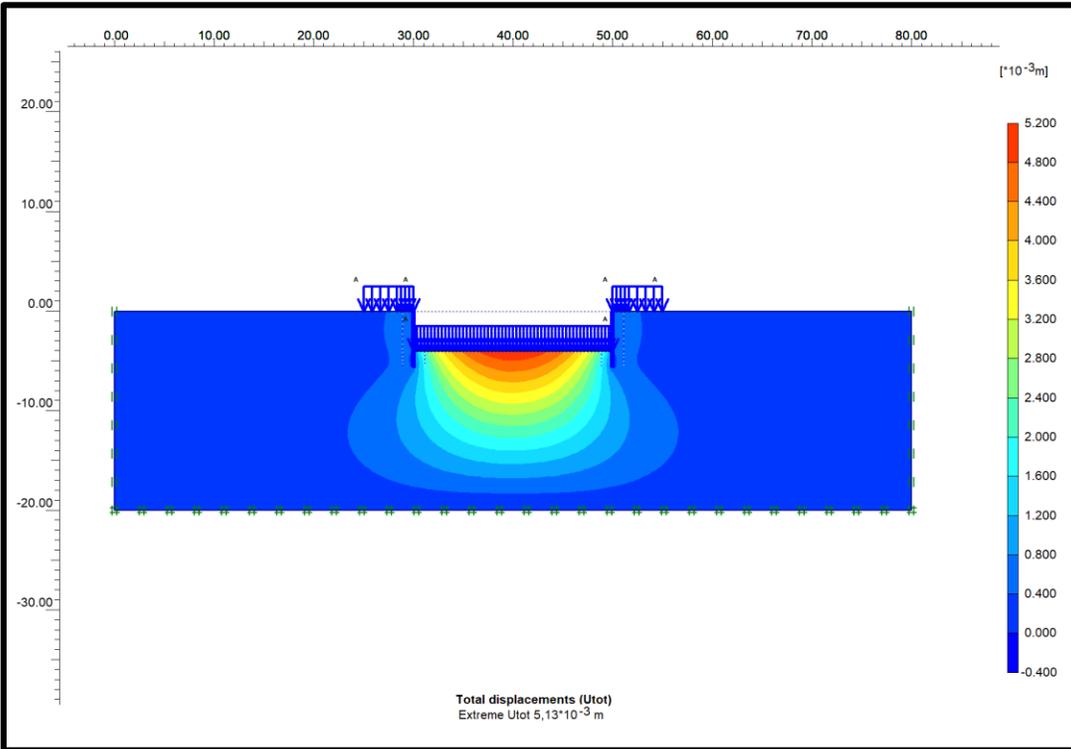
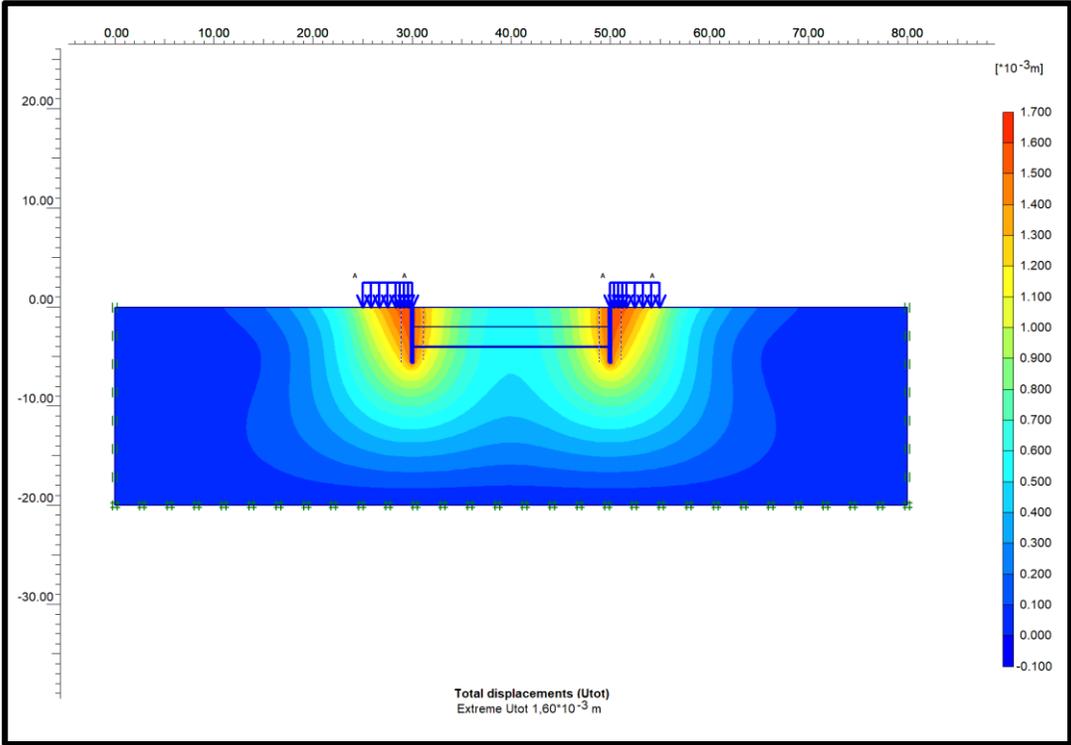


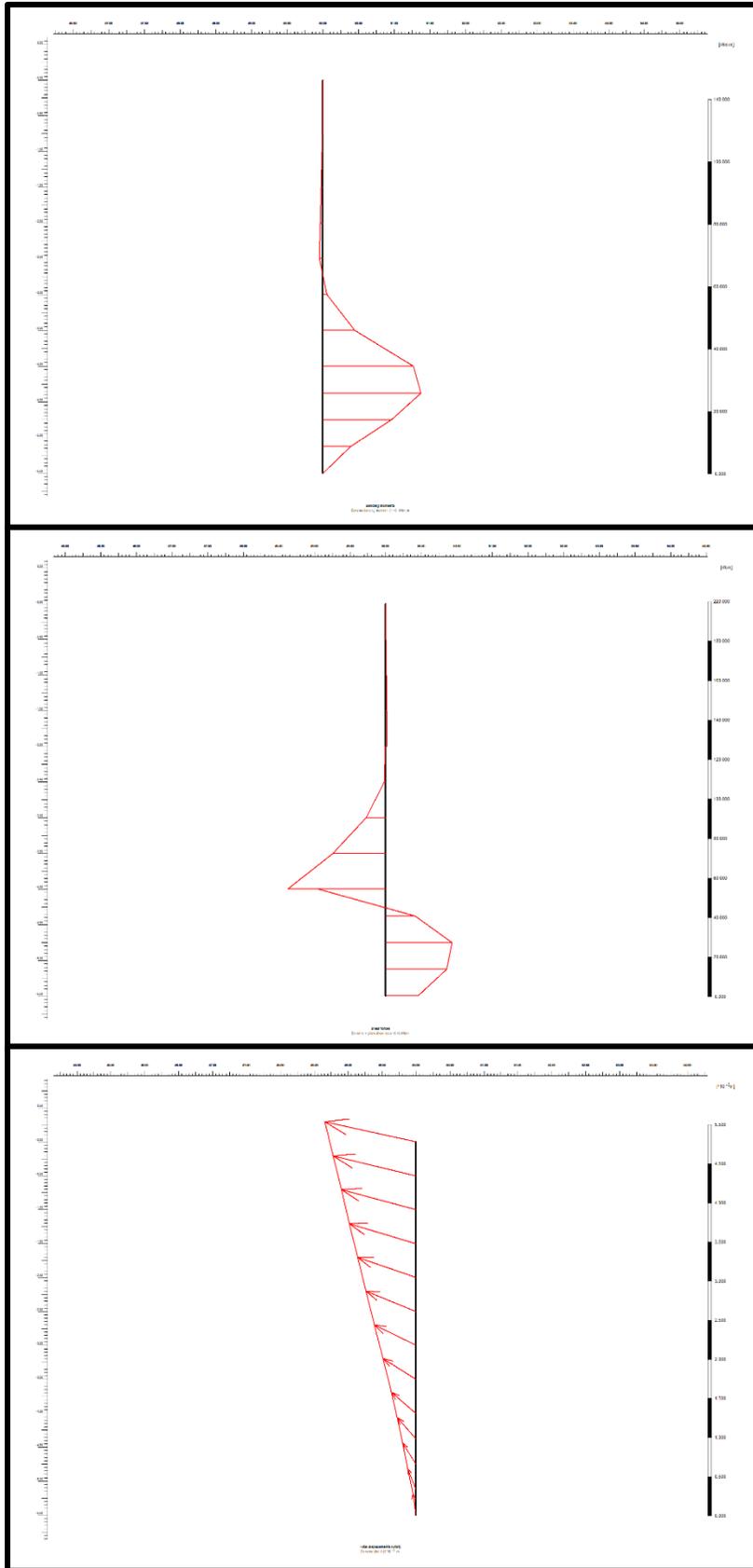
Modelo 2D con el estrato de arena limosa.



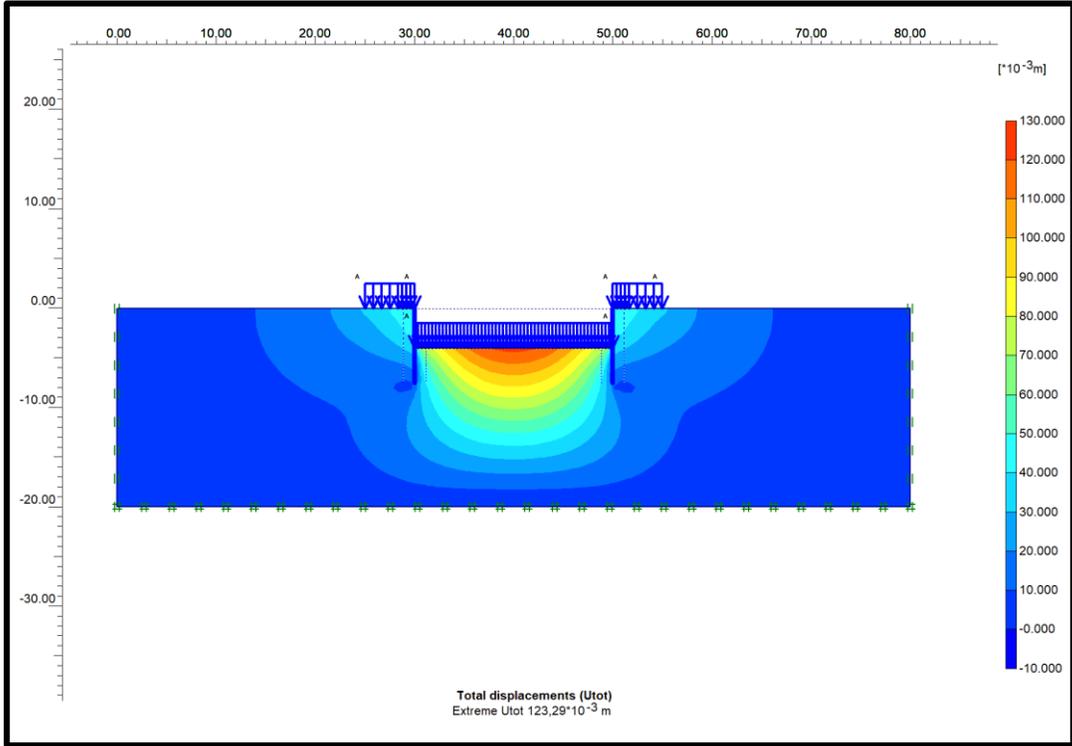
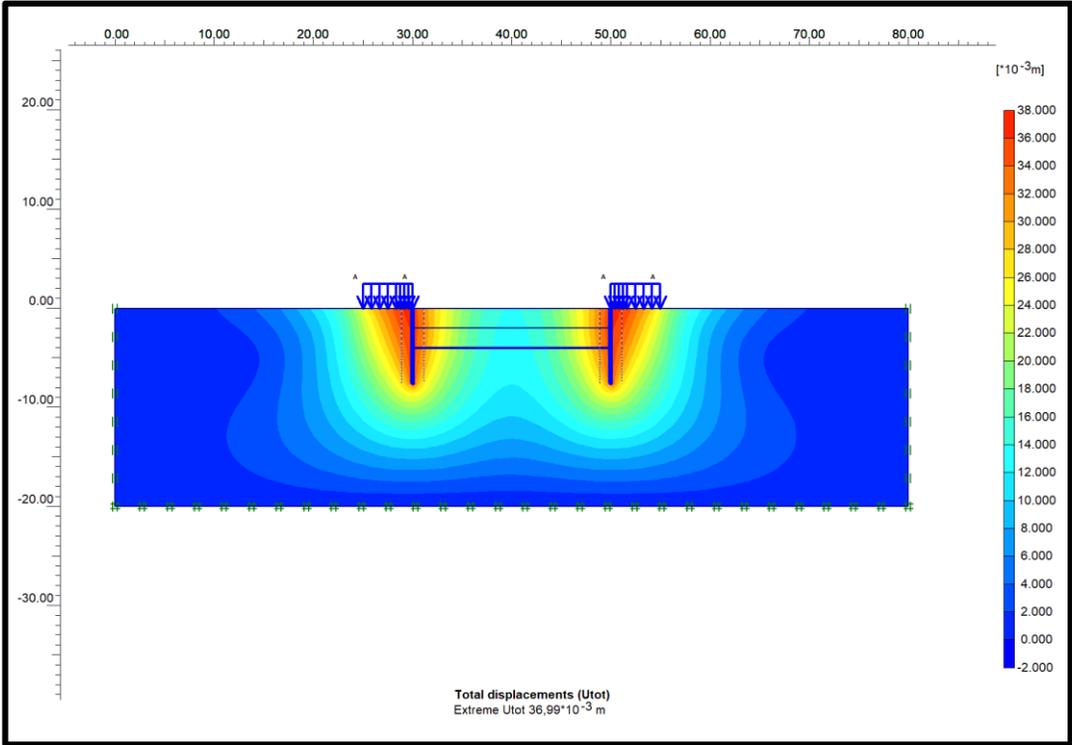


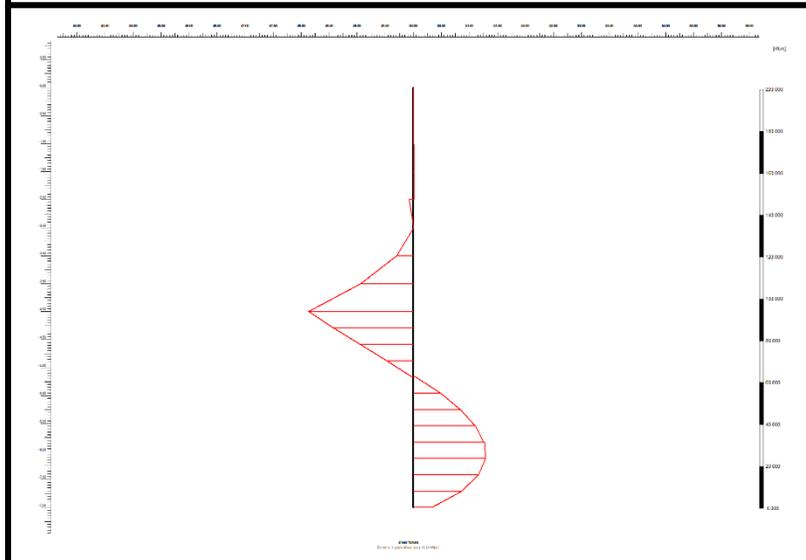
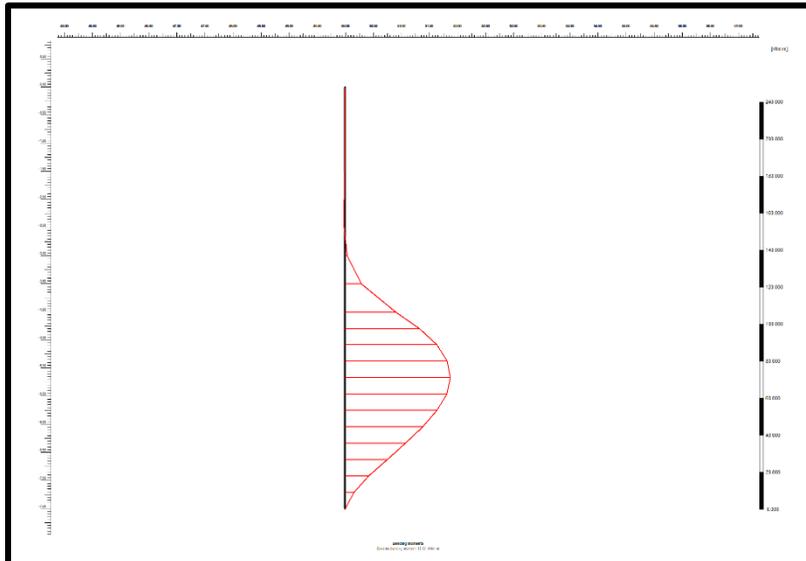
Modelo 2D con el estrato de toba.





Modelo 2D con el estrato de lutita.







**Anexo 6. Especificaciones de Fichas del Fondo Hondureño de Inversión Social**

Descripción	Criterios de Cálculo del Análisis de Costos	Criterios de Medición y Pago
<p style="text-align: center;">MUR O DE F0 MAMPOST U j 1 21005 ERIA nidad: 3 tem: 24</p> <p>Este trabajo consistirá en la construcción de muro conformada por piedras de río ó ripian unidas con mortero de cemento en una proporción 1:2 incluyendo gárgolas para drenaje de aguas lluvias PVC 3" RD-41 .La superficies de las piedras se deben humedecer antes de colocarlas, para quitar la tierra, arcilla o cualquier materia extraña; deben ser rechazadas las piedras cuyos defectos no se pueden remover por medio de agua y cepillo. Las piedras limpias se deben ir colocando cuidadosamente en su lugar de tal manera de formar en lo posible hiladas regulares. Las separaciones entre piedra y piedra no debe ser menor de 1.5 centímetros ni mayor de 3 centímetros. Se deben colocar las piedras de</p>	<p>Se considera una mezcla piedra-mortero en una proporción 70-30% con consideración de vacíos en la piedra del 43%.-La proporción en el mortero será 1: 2 considerando para cada m3 un promedio de 13.706 bolsas de cemento, 0.996 m3 de arena, 0.335 m3 de agua incluyendo un 25%</p>	<p>ME DICIÓN: La cantidad a pagarse por muro de mampostería de piedra labrada ripian ó de río será el número de</p>

<p>mayores dimensiones, en la base inferior seleccionando las de mayor dimensión para colocarlas en las esquinas de la estructura. Incluyendo la primera hilada, las piedras se deben colocar de tal manera que las caras de mayor dimensión queden en un plano horizontal, los lechos de cada hilada y la nivelación de sus uniones, se deben llenar y conformar totalmente con mortero. Cuando las piedras sean de origen sedimentario, se deben colocar de manera que el plano de estratificación quede en lo posible normal a la dirección de los esfuerzos. Excepto en las superficies visibles, cada piedra debe ir completamente recubierta por el mortero. Las piedras se deben manipular en tal forma, que no golpeen a las ya colocadas para que no alteren su posición. Se debe usar el equipo adecuado para la colocación de las piedras grandes que no puedan ser manejadas por medios manuales. No se debe permitir rodar o dar vuelta a las piedras sobre el muro, ni golpearlas o martillarlas una vez colocadas. Si una piedra se afloja después de que el mortero haya alcanzado el fraguado inicial, se debe remover la piedra y el mortero circundante y colocarla de nuevo. El mortero deberá ser una mezcla de cemento, arena y agua, la proporción a utilizar deberá ser 1:2, agregándole la cantidad de agua necesaria para formar una pasta de consistencia tal que pueda ser</p>	<p>adicional para curado durante el proceso de fraguado. Se incluye un ml. de tubo PVC de 3" por cada m3 de muro.</p>	<p>metros cúbicos medidos en la obra, de trabajos ordenados, ejecutados y aceptados por el supervisor de obra. PAGO: Estos precios y pagos constituirán la compensación total por suministro de materiales,</p>
--	---	---

<p>manejable y que permita extenderse fácilmente en las superficies de las piedras a ligar. El cemento y agregado fino, se deben mezclar con pala en seco, en un recipiente sin fugas, hasta que la mezcla tenga un color uniforme; después de lo cual se le agregará el agua para producir el mortero de la consistencia deseada. El mortero se debe preparar en cantidades necesarias para uso inmediato.</p>		<p>mezclado, transporte, colocación, acabado y curado de la mampostería para el muro así como por mano de obra, equipo, herramientas, materiales y operaciones conexas en la ejecución de los trabajos</p>
---	--	--

				descritos en esta especificac ión.	
F0	EXC			ME	
14002	AVACION			DICION:	
	ESTRUCTU	U	Í	La	
	RAL	nidad: 3	tem: 24	cantidad a	
<p>Este trabajo consistirá en la excavación estructural por medios manuales, en cualquier tipo de suelo desde arcilla, pasando por limos hasta arenas y gravas, que no requieren el uso de equipo pesado o explosivos. La estabilidad del suelo se controla con ademado de madera rustica de pino. El material producto de la excavación debe colocarse a un mínimo de 60 cms de la orilla del zanja y deberá desalojarse a un máximo de 10 m para su posterior acarreo.</p>				<p>La altura de excavación será variable y se deberá controlarse la estabilidad del suelo apuntalándose las paredes de la zanja, con madera rustica de pino. Se requiere de Mano de Obra No calificada (Peón 1. (25 JDR) y Herramienta Menor 10 %. No incluye el acarreo del material a un botadero. No se considera el desalojo de agua</p>	<p>Excavación Estructural será el número de metros cúbicos medidos en la obra, de trabajos ordenados, ejecutados y aceptados por el</p>

	<p>subterránea en esta actividad.</p>	<p>supervisor de obra.</p> <p>PAGO:</p> <p>Estos precios y pagos constituirán la compensación total por suministro de mano de obra, equipo, herramientas, materiales y operaciones conexas en la ejecución</p>
--	---------------------------------------	--

			de los trabajos descritos en esta especificación.
00004	<p>IC MUR</p> <p>O DE CONCRETO REFORZADO</p> <p>Unidad: <sup>3</sup> m<sup>3</sup> Item: 55</p> <p>Antes del vaciado, el Contratista hará el cimbrado de los ejes y las caras para la revisión y aprobación de la Interventoría. Así mismo, ésta revisará los cajones, para verificar la orientación de las caras y su disposición con respecto a los ejes, la plomada y la sección constante. Si en planos no se especifica lo contrario, el acabado será del Tipo C, (Concreto a la vista), según se describe en el ítem de acabados del concreto. El acero de refuerzo se limpiará con grata metálica hasta que quede libre de mortero, óxido, grasa o cualquier otro elemento que afecte la adherencia entre el acero y el concreto. EL tamaño máximo del agregado utilizado en el concreto para estas estructuras será del tipo</p>	<p>La proporción de concreto a utilizar es de 1:2:2 considerando por cada m<sup>3</sup> un promedio de: 9.835 bolsas de cemento, 0.552 M<sup>3</sup> de arena y grava y 0.239 m<sup>3</sup> de agua incluyendo un 25% adicional para el curado del concreto durante el proceso de fraguado del cemento. Se incluye un 5% de</p>	<p>ME DICION:</p> <p>El pago se hará por metro cúbico (m<sup>3</sup>), medido y aprobado por el Interventor. La sección del muro utilizado para los cálculos del</p>

<p>gravilla fina (Ø Max. 1”). El concreto utilizado tendrá una resistencia mínima de 4000 psi a los 28 días. Si por alguna razón, ésta especificación no aparece en los planos, se deberá consultar inmediatamente al Calculista para determinar este parámetro. La consulta estará a cargo del Contratista y deberá ser hecha por escrito, con anotación en el libro de obra. Cada 2.0 m, el Contratista construirá juntas de contracción, para lo cual deber seguir uno de los procedimientos descritos en la especificación de estos elementos las cual se pagarán por metro (m). Cada 20 m, el Contratista construirá expansión para lo cual deber seguir uno de los procedimientos descritos en la especificación de éstos. Entre la zarpa y el cuerpo del muro se construirá una junta de construcción de cortante, la cual se pagará por metro (m). Los muros de contención tendrán una longitud máxima de 6.0 m, en donde para continuar, será necesaria la construcción de una junta de construcción de profundidad total, que independice por completo los tramos de muros de contención. Cuando en el tramo de seis metros (6 m), el suelo no es homogéneo, se debe consultar al Ingeniero Calculista para la implementación de juntas adicionales. El Contratista dejará contra flechas a los muros de contención, construyendo el muro inclinado contra el relleno, a una</p>	<p>desperdicio en el cálculo del acero especificado en este rubro. El acero longitudinal y transversal se unirá con alambre de amarre de por lo menos 20 ms de largo. No Se considera la madera para encofrado en esta actividad, ya que la misma constituye una actividad independiente. Se considera el uso de equipo de mezclado y vibrado</p>	<p>volumen será la indicada en los planos. El valor del ítem incluye, todas las actividades anteriormente descritas en el alcance, mano de obra, herramientas, formaletas, equipos, suministro y vaciado de concreto,</p>
--	---	---

<p>distancia igual al 0.5 % de la altura. Inmediatamente después de retirada la formaleta, se verificará la lisura y nivelación de la cabeza del muro, así como la verticalidad de los elementos y su alineación, rechazando todos aquellos que no cumplan con las especificaciones en términos de acabado, tratamiento de hormigueros y reparación del concreto. Adicionalmente, deberá contar con tubos de salida (pases) para el drenaje de la masa contenida. La cantidad, profundidad, colocación y espaciamiento de los mismos, será según los planos y detalles, cuidando que queden perfectamente alineados. Los pases deberán estar libres de cualquier lechada o suciedad que los obstruya, o que disminuya su luz y deberán estar dotados con rejillas plásticas, según se indica en los planos. Se deben construir drenajes y filtros necesarios para que no se vaya a presentar sobre esfuerzos por presión hidrostática.</p> <p>Estos filtros estarán localizados en el trasdós del muro y tendrán su respectivo descole controlado para que no se vaya a presentar procesos de inestabilidad. En todos los casos, se hará primero el relleno de afirmados con recebo, frente al pie del muro hasta obtener el 95% del Proctor modificado; posteriormente podrá empezarse el relleno contra el espaldón. En el caso de rellenos horizontales en el espaldón del muro, se deberá procurar una pendiente mínima del 0.5%</p>		<p>amarre del acero de refuerzo, curado, limpieza y cualquier otra labor o elemento exigido por la Interventoría, que resulte necesario para desarrollar correctamente este trabajo.</p>
--	--	--

<p>para captar el agua de escorrentía, con el fin de evacuarla mediante una cañuela de corona a lo largo de la cabeza del muro, hasta un punto de captación.</p>		
<p>X                      PILO</p> <p>XXXXX            TE DE                      U                      í                      X</p> <p>                    CONCRETO    nidad:            3                      tem:            XXX</p> <p>                    Pilote de concreto, se considera la excavación con piloteadora con taladro de un metro de diámetro, a una profundidad de ocho metro, con ocho barras de acero de refuerzo grado cincuenta, distribuidas a una separación de cuarenta y cinco grados una de otra, con acero de refuerzo para cortante número cuatro a cada quince centímetros y concreto con resistencia de seis mil libras por pulgada cuadrada.</p>	<p>El concreto</p> <p>utilizado se</p> <p>considera comprado a contratista especializados a esta labor, que den garantía de las seis mil libras por pulgada cuadra de resistencia a la compresión solicitada bajo especificación, la excavación es realizada únicamente por la piloteadora y el pilote no requiere encofrado estructural, se debe</p>	<p>ME</p> <p>DICIÓN:</p> <p>para la medición del pilote se considera el diámetro de la base por la altura o profundida d de excavación</p>

	realizar un inspección previa a la instalación de la canasta de refuerzo estructural.	
--	---	--

## Anexo 7. Visto bueno del asesor temático

Aprobación de Investigación 

 **Dorian Espinoza** 22:40 (hace 18 minutos)  

para yo ▾

Ing. Rivera,

Por medio de este correo le doy el VB de aprobación a su investigación.

Saludos,

Dorian Espinoza  
Director de Geotecnia  
GeoConsult

## Anexo 8. Visto bueno del asesor metodológico

### Aprobación para entrega de Trabajo Final de Graduación



RIVERA A RIVERA VIANNEY PATRICIA

Ayer, 18:20

JORGE GUILLERMO BUSTILLO BARAHONA; ROBERTO RIVERA CERRATO ✕



Responder a todos | ▾

Señores

Facultad de Postgrado

Estimados señores:

En mi condición de docente de la asignatura de Proyecto de Graduación, sección **10047**, por este medio hago constar que el Trabajo Final de Graduación "**COMPORTAMIENTO DE PANTALLA DE PILOTES DE CONCRETO PARA TUNELES VEHICULARES EN DISTINTOS TIPOS DE SUELOS EN TEGUCIGALPA**", sustentada por **JORGE GUILLERMO BUSTILLO BARAHONA y ROBERTO RIVERA CERRATO**, previa a la investidura del título de **INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS**; cuenta con mi aprobación para su entrega a la facultad.

**MSc. Patricia Villalta**  
**Docente de Proyecto de Graduación**  
**Facultad de Postgrado**  
**Cel. 3179-3322**