



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN EN SUELOS
PIROCLÁSTICOS UTILIZANDO SAP2000**

Julio René Tobar García

Asesorado por MS.c. Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN EN SUELOS
PIROCLÁSTICOS UTILIZANDO SAP2000**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JULIO RENÉ TOBAR GARCÍA

ASESORADO POR MS.C. ING. DANIEL ALFREDO CRUZ PINEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADARA	Inga. Lesbia Magali Herrera
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañon Lopez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS Y DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN EN SUELOS PIROCLÁSTICOS UTILIZANDO SAP2000

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 22 de octubre de 2022.

Julio René Tobar García



EEPFI-PP-1902-2022

Guatemala, 11 de noviembre de 2022

Director
Armando Fuentes Roca
Escuela De Ingenieria Civil
Presente.

Estimado Mtro. Fuentes

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **ANÁLISIS Y DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN EN SUELOS PIROCLÁSTICOS UTILIZANDO SAP2000**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Interacción Suelo-Estructura - Cimentaciones especiales**, presentado por el estudiante **Julio René Tobar García** carné número **201503521**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en CIENCIAS en Estructuras.

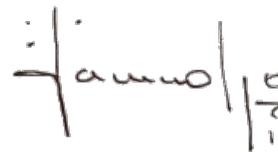
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

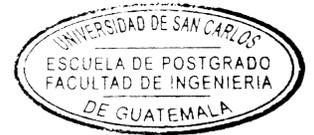
"Id y Enseñad a Todos"


Msc. Daniel Alfredo Cruz Pineda
Ingeniero Estructural
Cot. 9613

Mtro. Daniel Alfredo Cruz Pineda
Asesor(a)



Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador(a) de Maestría





Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

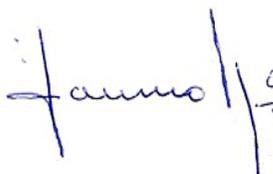




EEP.EIC.1547.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **ANÁLISIS Y DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN EN SUELOS PIROCLÁSTICOS UTILIZANDO SAP2000**, presentado por el estudiante universitario **Julio René Tobar García**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Mtro. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela De Ingenieria Civil

Guatemala, noviembre de 2022



Facultad de Ingeniería

Decanato
24189101-
24189102

secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.472.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS Y DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN EN SUELOS PIROCLÁSTICOS UTILIZANDO SAP2000**, presentado por: **Julio René Tobar García**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, mayo de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme las fuerzas para salir adelante siempre estar presente en mi vida
Mis padres	Bernardino Tobar y Virgilia García, por brindarme su apoyo incondicional
Mi hermano	Diego Tobar, por apoyarme en mi formación académica
Mis hermanas	Dulce y Fabiola Tobar, por estar siempre a mi lado
Mi sobrino	Diego Gómez, por darme alegría todos los días

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante parte en mi formación estudiantil
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de formarme como un profesional
Mis amigos	Por siempre brindarme sus consejos y compañía
Ingenieros	Por otorgarme sus conocimientos y experiencias

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
6. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Característica de los suelos piroclásticos	17
7.2. Definición de pilotes	18
7.3. Características de los pilotes de fricción.....	19
7.4. Coeficiente de balasto	21
7.5. Características en los pilotes cimentados en grupos.....	22
7.6. Fricción negativa	23
7.7. Modelación por SAP200	23

7.8.	Métodos para obtener las propiedades del suelo.....	24
7.8.1.	Ensayo SPT	24
7.8.2.	Ensayo CPT	24
7.8.3.	Hipótesis.....	26
8.	METODOLOGÍA	29
8.1.	Fase 1 investigación de campo del suelo.....	29
8.1.1.	Estudios geotécnicos	30
8.1.2.	Exploración en el campo	30
8.1.3.	Penetrómetro estándar SPT	30
8.1.4.	Cono holandés tipo eléctrico CPT	31
8.2.	Fase 2 investigación teórica inicial	31
8.3.	Fase 3 Diseño de pilotes	32
8.3.1.	Estimación de la longitud del pilote	32
8.3.2.	Resistencia por fricción del pilote, Q_f	32
8.4.	Fase 4 modelación de las variables en SAP2000	33
8.4.1.	Capacidad de carga en grupos de pilotes	33
8.4.2.	Método para realizar la prueba de los pilotes de fricción.....	33
8.4.3.	Método Winkler	34
8.5.	Fase 5 análisis de resultados.....	34
8.5.1.	Redacción y organización de las conclusiones	35
8.5.2.	Redacción del reporte final de la investigación	35
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	37
9.1.	Ordenamiento y tabulación de los datos obtenidos.....	37
9.1.1.	Análisis estadístico de los resultados	37

10.	ÍNDICE PARA EL INFORME FINAL	39
11.	CRONOGRAMA.....	41
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	43
	REFERENCIAS	45
	APÉNDICES	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pilotes de fricción	20
2.	Ejemplo de ensayo CPT	25

TABLAS

I.	Definición de variables	26
II.	Cronograma de actividades.	41
III.	Costos relacionados con la investigación.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Φ	Ángulo de fricción interna
Σ	Sumatoria
As	Área de acero
C	Unidad de cohesión
Cs	Coefficiente sísmico al límite de cedencia
e	Excentricidad
Fy	Límite de fluencia del acero
f'c	Resistencia a la compresión del concreto.
Io	Índice de sismicidad.
TIR	Tasa Interna de Retorno.
qa	Capacidad portante del suelo.
Qa	Capacidad de carga última del suelo

Qp	Capacidad de punta en el pilote
Qf	Resistencia por fricción superficial generado en la interfaz suelo pilote
γ	Peso unitario del suelo

GLOSARIO

AGIES	Asociación Guatemalteca de ingeniería Estructural y Sísmica.
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés <i>American Society for Testing and Materials</i>).
Ángulo de fricción interna	Ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr en un punto que representa una condición dada de esfuerzo de ruptura de un material sólido.
Centro de masa	Posición definida con relación a un objeto o a un sistema de objetos. El promedio de la posición de todas las partes del sistema.
Centro de rigidez	Punto central de los elementos verticales de un sistema que resiste a las fuerzas laterales.
Coefficiente sísmico	Coefficiente que se emplea para ajustar el cálculo de la sobrecarga sísmica horizontal en la base del edificio, a la relación entre el periodo de vibración de la estructura y del terreno donde se asienta.
Coefficiente de rugosidad	Es un índice el cual determina la resistencia de un flujo en la tubería.

Cohesión	Fuerza de unión entre las partículas de un suelo, cuya magnitud depende de la naturaleza y estructura de este.
Concreto	Es una mezcla de materiales como la arena, grava y gravilla, y cemento, que sirve como aglutinante. Es un material que para endurecer solo se necesita agua durante el mezclado.
Deformación	Es el cambio de tamaño o su forma debido a fuerzas externas aplicadas al objeto.
Densidad	Es la relación entre la masa de una sustancia y el volumen que ocupa.
Ensayo de compresión triaxial	Determina el máximo esfuerzo cortante que sufre una masa de suelo al ser sometida a cargas axiales. Permite reproducir las condiciones del terreno, aplicando sobre las muestras presiones de compresión y confinamiento.
Esfuerzo	Es cuando una fuerza actúa sobre el área unitaria en la que se aplica, existen esfuerzos de tensión, compresión y cortantes.
Humedad	Representa el porcentaje del peso de agua en una determinada masa de suelo con respecto al peso de partículas sólidas.

Índice de sismicidad	Es un índice rápido de la amenaza sísmica que corresponde a la nomenclatura de 0 a 4.
NSE	Normas de Seguridad Estructural.
NPS	Nivel de protección sísmica
Pendiente	La pendiente del terreno es un punto dado como el ángulo que toma el plano horizontal con el plano tangente a la superficie del terreno.
Rugosidad	Medida empleada para caracterizar la textura de la superficie, son pequeñas desviaciones verticales de la superficie nominal que vienen normalmente determinadas por las características del material.
Velocidad	Esta asociada al cambio de posición de un cuerpo solido o líquido a lo largo del tiempo.

RESUMEN

El estudio entre la relación del suelo y la estructura toma relevancia cuando se requiera realizar un modelado que se acerque a la realidad, esto requiere de evaluar la gran cantidad de variables que intervienen y el problema que hace difícil predecir como va a actuar la cimentación ante las cargas que le solicite la estructura, más cuando ocurran eventos sísmicos o el suelo presente condiciones adversas como los que presentan los suelos piroclásticos, donde se requiere implementar cimentaciones especiales.

Durante esta investigación se realizará una modelación de la interacción suelo-pilote, en donde el suelo interactúa con la cimentación por medio de resortes que emulen las condiciones del suelo asociados al coeficiente de balasto. Por lo que se desarrollará por el método de elementos finitos que permite integrar las características que rigen el comportamiento de los materiales y se apoyara en el programa SAP2000, que es el más indicado al momento de analizar problemas con elementos finitos.

En consecuencia los objetivos de esta tesis consisten en determinar el coeficiente balasto y su influencia en el comportamiento de la cimentación profunda, al mismo tiempo se determinará cómo se comportan los pilotes estos al diseñarse en grupos, por lo que se requerirá obtener resultados de la eficiencia de los pilotes en grupos, también se considera la influencia de la fricción negativa que toma relevancia al tomar en cuenta la distancia en la que se colocan los pilotes.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que en ocasiones se presenta la necesidad de edificar sobre terrenos con poca capacidad de carga, se recurre a la implementación de cimentaciones profundas. Pero en muchos casos en edificios de gran altura y rigidez, se presentan problemas al evaluar las características de los pilotes de fricción y su transferencia de cargas a los suelos piroclásticos.

Para el abordaje de esta investigación se partirá de una indagación del subsuelo para determinar las características y propiedades de los suelos piroclásticos, esta exploración se llevará a cabo con el método de penetración estándar SPT (*Standard Penetration Test*), considerando su amplio uso en el campo de la exploración del suelo, al ser sencillo y rápido su aplicación.

Con las características y propiedades de los suelos piroclásticos, se diseñarán los pilotes de fricción, este proceso se llevará a cabo con técnicas y metodologías descritas en el marco teórico referencial, se determinarán la longitud y diámetro del pilote, y la cantidad de pilotes que se necesitarán para trasladar las cargas que le proporcione la estructura al suelo. Definiendo por medio la modelación de las variables en el programa de SAP2000, esperando emular el comportamiento que tenga los pilotes de fricción en los suelos piroclásticos.

Se procesarán los datos obtenidos de la modelación de las variables en SAP2000, en el programa de Excel, ordenando y tabulando los datos de manera que se pueda dar por válida o no la hipótesis definida en su posterior capítulo, y por medio de la estadística inferencial y la aplicación del Método de Simulación

de Monte Carlo con la prueba de la normalidad, se esperará determinar cómo variará el asentamiento total que sufrirá la estructura.

Con esta investigación se buscará representar de una mejor medida el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos, teniendo en consideración la utilización de los métodos numéricos que den validada la información presentada durante el desarrollo del proyecto. Con esta información se esperará que los proyectistas y diseñadores tengan una base teórica y que lleven a la práctica el uso de los pilotes de fricción teniendo de base esta investigación en sus diseños y cálculos posteriores.

2. ANTECEDENTES

Para abordar el tema de las cimentaciones profundas en suelos piroclásticos, se hace necesario citar otros estudios para tener el enfoque necesario en la investigación. Para definir las variables que se presenten se menciona los siguientes autores:

Carrillo (2016), define a “las capas del subsuelo próximas a la superficie son muy compresibles, y se forman por arcilla muy blanda, se utilizan cimientos profundos constituidos por elementos alargados que transmiten parte o todo el peso del edificio a estratos profundos” (p. 16).

Bajo esta premisa se determina que en los suelos blandos la utilización de pilotes es la opción que se recomienda para cimentar, pero en los casos que no se posea a una profundidad razonable Bernardo y Ramírez (2021) recomiendan que “cuando no se tiene una capa de roca o material duro a una profundidad razonable, los pilotes de carga de punta resultan muy largos y antieconómicos” (p. 18).

Es necesario optimizar la cimentación en suelos blandos, se necesita que el pilote como el suelo ejerzan la fricción necesaria que sostenga la estructura, como lo describe Sardón y Sasaki (2020) “la transmisión de la carga a través de la fricción de la superficie entre el pilote y el suelo y a su vez se puede subdividir, en pilotes de fricción en suelos de granulares muy permeable” (p. 14). Tomando en cuenta la necesidad de cimentar en suelos piroclásticos y que estos poseen las propiedades de suelos blandos o con gran contenido de piedra pómez, se

recomienda la utilización de las variables que autores en estudios anteriores utilizaron para diseñar la cimentación requerida en suelos piroclásticos.

Bajo estas condiciones que desfavorecen la cimentación en suelos piroclásticos, se hace necesario investigar sobre las posibles causas y efectos que ofrecen las variables que los suelos poseen, para recalcar en ello Torres (2022) describe que “La respuesta mecánica de los pilotes frente a cargas laterales, se encuentra influenciada por los efectos de la interacción suelo-estructura a lo largo del pilote” (p.25), lo que “en su interacción con el terreno circundante debido a la relación entre la capacidad y rigidez lateral del suelo y los esfuerzos internos en los pilotes” (Torres, 2022, p. 25).

Como se ha considerado anteriormente, la interacción suelo-estructura tiene que proporcionarle a la estructura las condiciones que no afecte en los asentamientos que aparezcan por la consolidación del suelo por el peso propio de la estructura.

Méndez (2019), determina el número de pilotes como “para estimar el número de pilotes que son necesarios para soportar las cargas producidas por la edificación, se tendrá en cuenta el peso que ejerce la estructura y el peso de la platea de cimentación” (p. 35). Con la cantidad de pilotes estimada, hace necesario calcular la separación entre ellos, como lo hace mención Jiménez (2018), “la separación entre ejes de pilotes es bastante importante, debido a que el comportamiento de un pilote aislado difiere mucho de un grupo de pilotes” (p. 38).

Debido a que los pilotes de fricción trabajan con el suelo, se necesita determinar si los pilotes se diseñarán en grupo o por separado, tomando en cuenta que los pilotes separados ofrecen mayor capacidad de soporte.

Anteriormente se mencionó, que la capacidad de soporte del pilote tanto en grupo como individual varían según la distancia a la que están, Urbina (2004) presenta una definición que determina otra característica que necesitan priorizar al diseñar pilotes como a “la fricción superficial no necesariamente es igual a la cohesión del suelo, ya que el hundido de un pilote a un suelo cohesivo puede alterar las características físicas de este hasta una extensión importante” (p. 23).

Al calcularse el número de pilotes se debe de considerar el efecto que se presenta si estos deben de diseñarse en grupos, Aguilar y Avilés (2003) define este efecto como “la respuesta de un grupo de pilotes puede determinarse con buena aproximación al emplear factores de interacción, obtenidos del efecto entre dos pilotes” (p. 9). Cuando se calculen los pilotes en grupos es necesario contemplar el cálculo del efecto entre dos pilotes, entre este cálculo debe de determinar la resistencia que ofrezcan el grupo de pilotes como lo define Camacho y Mediavilla (2019) “la proximidad de los pilotes da lugar... no se pueda estimar la capacidad del grupo como la suma de la capacidad de cada uno de los pilotes considerados aisladamente, se puede estimar su deformabilidad de un pilote aislado” (p. 37).

Tanto como el efecto que se da en los pilotes y su resistencia en grupos, debe de calcularse la capacidad que otorguen, con tal de calcular la capacidad en los pilotes se necesitará de métodos analíticos, Mackenzie y Vega (2021) describe que estos métodos deben determinar “la capacidad de carga última de un pilote individual se define como la capacidad de carga de la punta del pilote más la fricción producida en el fuste del pilote” (p. 27), tanto la longitud y su sección transversal será determinante para que los pilotes ofrezcan la resistencia suficiente en el fuste y transfiera las cargas al suelo sin ocasionar deformaciones.

Por lo que se debe de calcular esa capacidad de carga en los pilotes por fricción, puede utilizarse el método analítico, Vicente (2019), lo describe como “El método α usa como base el esfuerzo cortante no drenado de los suelos cohesivos, por lo que es adecuado para calcular la capacidad de carga de pilotes mediante un análisis no drenado” (p. 15). Tomando la consideración apropiada al tema se tiene que “para calcular la capacidad de carga por fricción, se hace empleo de un factor α , el cual se obtiene a partir de ecuaciones semiempíricas” (Vicente, 2019, p. 15).

Estos métodos determinan la capacidad de carga a lo largo del fuste en los pilotes de fricción, tomando en consideración las propiedades del suelo y las dimensiones de los pilotes.

Estos resultados se toman de las condiciones del suelo, hay ocasiones donde al asentarse el suelo produce fuerzas contrarias a las fuerzas que el pilote, Orellana y Paitán (2020) lo define como “el suelo que rodea la parte superior del pilote se puede asentar con relación al pilote, cambiando la dirección de las fuerzas de fricción en el lado del pilote y tendiendo a jalarlo hacia abajo” (p. 20).

Adaptando toda la teoría que hace posible diseñar los pilotes de fricción, falta contemplar el análisis bajo posibles cargas externas, y estos son los sismos. Guatemala al estar constantemente afectada por ellos es de prioridad incluir un análisis de cómo se comportará los pilotes de fricción ante estos efectos, Hernández (2018) expresa “Las experiencias durante el terremoto de septiembre de 1985 las cimentaciones con pilotes de fricción presentaron un comportamiento desfavorable, produciendo asentamientos diferenciales permanentes e irreversibles en las estructuras y en otros casos, el colapso” (p. 35).

Estas vivencias demuestran que tan importante es determinar cómo se comportan las estructuras ante tales hechos y por esto se deben de tomar parámetros adicionales. Ya que al estar cimentados en pilotes de fricción los edificios ante las fuerzas estos suelen voltearse y dañar considerables edificios aledaños. Bolaños (2019) considera “importante estudiar el efecto del choque estructural en suelos blandos, considerando los efectos de la interacción dinámica suelo-estructura, particularmente en estructuras con cimentaciones que no se apoyan en el estrato firme” (p. 159).

Se puede notar la carencia al diseñarse los pilotes de fricción de las acciones sísmicas, ya que solo se toman en consideración las características en el suelo y las dimensiones y el peso de los edificios. Se hace necesario estudiar los efectos del sismo, y otro aspecto que se necesita es lo que menciona Campos (2020), que se “hace evidente la importancia de estimar cuidadosamente y bajo el criterio de un ingeniero geotécnico y estructural el valor del coeficiente de balasto a utilizar en el diseño final” (párr. 9).

Con estos criterios definidos se necesita que tanto los diseñadores como los proyectistas integren en sus cálculos los parámetros antes mencionados. Cabe destacar que la cimentación profunda no es un tema nuevo a investigar, este tema en otros países ya se ha abordado el estudio del diseño y comportamiento de los pilotes de fricción, un hecho importante que dependiendo de la región en donde se abarca el estudio varía y por lo consiguiente se necesita de una investigación de como a nivel nacional se pueda analizar estas cimentaciones profundas adaptándolas a las características que posee el suelo, en este caso los suelos piroclásticos, ya que la región tiene varios volcanes que le proporcionan estas características al suelo y se necesita realizar una investigación que abarque estos parámetros en su estudio.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala donde la diversidad en las propiedades y los tipos de suelos suelen variar según las regiones, estos suelos en muchas ocasiones son de arena limosa, limos arenosos, limos arcillosos y estas son propiedades que tienen los suelos piroclásticos. Sin embargo, suelen encontrarse vetas de rocas que por lo general no suelen dificultar la cimentación de los pilotes sobre estas bases rocosas, caso contrario, en la mayoría de los sitios no hay una base sólida, dado que, las características de los pilotes de fricción deben sustentar estas deficiencias que poseen los suelos piroclásticos para transportar las cargas de la estructura al suelo.

En ciertas regiones del país se encuentran ubicados volcanes que marcan cierta característica distinta a los suelos, esto se debe por sus eventuales actividades volcánicas que depositaron productos piroclásticos a lo largo de los años. En estos depósitos suele predominar la piedra pómez, la cual es un tipo de piedra de silicato de aluminio de hierro, de poca densidad que dota al suelo de poca resistencia a la compresión. Dada la baja compresibilidad que dota al suelo pueden ocurrir asentamientos, lo que ocasiona deformaciones en el suelo relacionado a la tensión actuante entre el pilote y la estructura le ejercen a la base donde se esté cimentando.

En proyectos donde se construyen edificios de gran altura y rigidez, los pilotes en muchos casos deberán someterse a un número específico de pruebas que limiten el estudio del comportamiento entre la relación del suelo-estructura, esto se debe a que en el campo los pilotes se construyen en grupos y esta cantidad depende de la magnitud del proyecto, estos grupos de pilotes se diseñan

para que estén a la par, por lo que en suelos piroclásticos puede ocurrir que en grupo de pilotes se interpongan entre ellos fuerzas que desestabilicen la estructura.

Debido a las condiciones del terreno la cimentación profunda debe de seleccionarse con los elementos que sean compatibles con la profundidad y propiedades mecánicas del suelo que proporciona una transferencia adecuada de las cargas de la edificación sin que ocasione posibles fallas y que permita la funcionalidad de la estructura.

Por lo anterior, se formula la siguiente pregunta principal:

- ¿Cuáles son las características que deben cumplir los pilotes de fricción para cimentarse en suelos piroclásticos?

Además, se plantean las siguientes interrogantes secundarias:

- ¿Cómo influye en el diseño de pilotes de fricción el módulo de balasto en suelos piroclásticos?
- ¿Qué criterios se deben tomar en el diseño con respecto a los grupos de pilotes en suelos piroclásticos?
- ¿Cómo afecta la fricción negativa al diseñarse los pilotes en grupos en suelos piroclásticos?
- ¿Cómo se comportarán los pilotes de fricción en suelos piroclásticos al ser analizados con SAP2000?

4. JUSTIFICACIÓN

Se desarrollará la investigación acerca del análisis y diseño de pilotes de fricción en suelos piroclásticos, donde se torna importante su estudio, porque se puede al darse caso que en suelos donde no se tiene una base sólida donde se pueda sostener la estructura a una profundidad razonable, se deba diseñar la cimentación con pilotes de fricción, esto hace necesario analizar el comportamiento de los pilotes de fricción.

Por lo que se considera importante realizar el estudio de los pilotes de fricción ya que, beneficiará a los diseñadores que, al optar por la cimentación con pilotes de fricción, les permitirá desarrollar proyectos sin restricción de las condiciones de los suelos piroclásticos, aumentado la resistencia de carga sobre suelos de poca capacidad a la compresión.

También los estudiantes de ingeniería civil y de la maestría de estructuras tendrán acceso a conocimientos de cómo analizar y diseñar los distintos tipos de pilotes y que, en un futuro, puedan aplicar al desarrollo de proyectos de gran altura en suelos piroclásticos.

Finalmente, la aplicación de este conocimiento propicia el desarrollo de nuevas tecnologías e innovaciones que consigan colocar en el mercado de la construcción la fabricación y colocación de los pilotes.

5. OBJETIVOS

General

Evaluar las características de los pilotes de fricción y su transferencia de cargas a suelos piroclásticos.

Específicos

1. Calcular cómo influye el módulo de balasto en el diseño de pilotes de fricción en suelos piroclásticos.
2. Determinar el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos al diseñarse en grupos.
3. Determinar la influencia de la fricción negativa en los pilotes de fricción cuando se diseñen en grupos.
4. Analizar en SAP2000 el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos.

6. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación es de diseño experimental, que pretende realizar un alcance descriptivo del análisis y diseño de la cimentación profunda en suelos piroclásticos, se enmarca en la línea de investigación *Interacción Suelo-Estructura*, que pertenece al pensum de estudios de la Maestría de Ingeniería en Estructuras, de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala USAC, específicamente en la sub línea de cimentaciones especiales.

En la mayoría de las obras, los pilotes se deben someter a un número de pruebas en campo que garantice la confiabilidad de los cálculos efectuados y que el comportamiento que tenga el suelo debido a la compresión axial en el pilote esté entre los valores tolerables. Esto permitirá asegurar que los parámetros sugeridos en el diseño sean los adecuados según las propiedades que tenga el suelo. Estas pruebas se tratarán de analizar con SAP2000 ya que para el caso de analizarlas en el campo se requiere de recursos específicos de algún sitio.

Es necesario considerar los métodos que ayuden en la optimización de recursos en la obra al utilizar los pilotes adecuados, por lo que es importante realizar un perfil estratigráfico del suelo que establezca la cota y profundidad del terreno, el nivel freático, etc., elementos fundamentales durante la fase de diseño.

Realizar el análisis de pilotes de fricción en suelos piroclásticos, le permite al diseñador realizar una cimentación que garantice la seguridad de la estructura, al proporcionarle un criterio con respecto al estudio de cómo interactúa el suelo y el pilote bajo las cargas que les transmitan la estructura.

7. MARCO TEÓRICO

En el marco de esta investigación, se tratarán de abarcar las variables que afectan el desempeño de pilotes de fricción en suelos piroclásticos, tanto en el diseño como en su análisis con los parámetros que afecten su desempeño estructural.

7.1. Característica de los suelos piroclásticos

El origen de los suelos piroclásticos se da en las erupciones volcánicas y su consecuente precipitación a lo largo de los años, lo que genera que las cenizas volcánicas doten al suelo de características que define Aguilar y Alva (1991) como “su origen volcánico, generalmente contienen fragmentos de piedra pómez y cenizas volcánicas, por lo que presentan pesos unitarios bastante bajos; además, debido a la forma en que han sido depositados, en algunos lugares se encuentran en estado suelto” (p. 4).

Bajo otros estudios que se realizan a determinadas profundidades revelan cómo estos suelos pueden consolidarse con el tiempo, Padilla (2019), muestra este proceso “De los resultados de la exploración del subsuelo, la estratigrafía típica encontrada se observa que hasta cerca de los 5.0 metros se presentan rellenos artificiales de materiales de pavimentación y de arenas de pómez, con humedad y compacidad suelta” (p. 2).

Definiendo a partir “De los 5.0 a 30.0 m, predominan suelos granulares areno-limosos con gravillas pumíticas, de compacidad suelta a media (de 4 a 34 golpes en la prueba de penetración estándar), hasta aproximadamente 10.0 m

de profundidad” (Padilla, 2019, p. 2), considerando que “a partir de este nivel y hasta los 30.0 m una compacidad errática entre suelta, media y alta; en los últimos tres metros, final del sondeo, se encontraron, una arcilla meteorizada y un aglomerado volcánico” (Padilla, 2019, p. 2).

Bajo estas investigaciones se puede definir que los suelos piroclásticos presentan poca resistencia a la compactación, no permitiendo realizar una cimentación superficial y al final genera una complicación cuando se necesite cimentar sobre estos suelos. Por lo que se requiere de la utilización de una cimentación que cubra con los requerimientos necesarios.

7.2. Definición de pilotes

Para cumplir con los requerimientos que permiten sostener una estructura sobre suelos piroclásticos, se requiere del diseño de una cimentación especial, esta cimentación se conoce como cimentaciones profundas, y permiten distribuir las cargas de los edificios a través del suelo a una profundidad específica, existen diferentes cimentaciones profundas y esto depende de la zona y propiedades del suelo donde se está cimentando. Laporte y Rodríguez (2011) describen estas cimentaciones cómo “Se utiliza una cimentación profunda cuando los esfuerzos inducidos en el terreno por las cargas aplicadas son mayores que la capacidad de soporte de las capas superficiales” (p. 4). o “cuando los asentamientos potenciales de una cimentación superficial excedan los valores permisibles para el tipo de estructura considerado” (Laporte y Rodríguez, 2011, p. 4).

En este tipo de cimentación se hacen presentes los pilotes de punta y los de fricción o una combinación de ambos. Los pilotes de punta requieren que a una profundidad razonable se encuentre una base de roca o suelo que resista las cargas que se les transfiera. En consecuencia, al tener que cimentar sobre

estos suelos se debe de considerar a que profundidad de la estructura se tiene una base lo suficientemente sólida para transferir las cargas, si esta base está a una profundidad que no haga viable este tipo de cimentación se necesita diseñar con pilotes de fricción.

7.3. Características de los pilotes de fricción

Garza (2004), define a los pilotes de fricción como:

Si el pilote está embebido en su totalidad en un estrato de baja a media rigidez, sin alcanzar un estrato que aumente su rigidez drásticamente el aporte de la fricción en el fuste aplicado sobre el área lateral del pilote es normalmente considerablemente mayor que el aporte de la resistencia por punta aplicada a un área relativamente pequeña. (p. 69)

Por lo consiguiente se requiere determinar su capacidad, como la define Cano (2018) “la máxima capacidad de carga por fricción está en función de la resistencia al corte del suelo a lo largo del fuste del pilote” (p. 23).

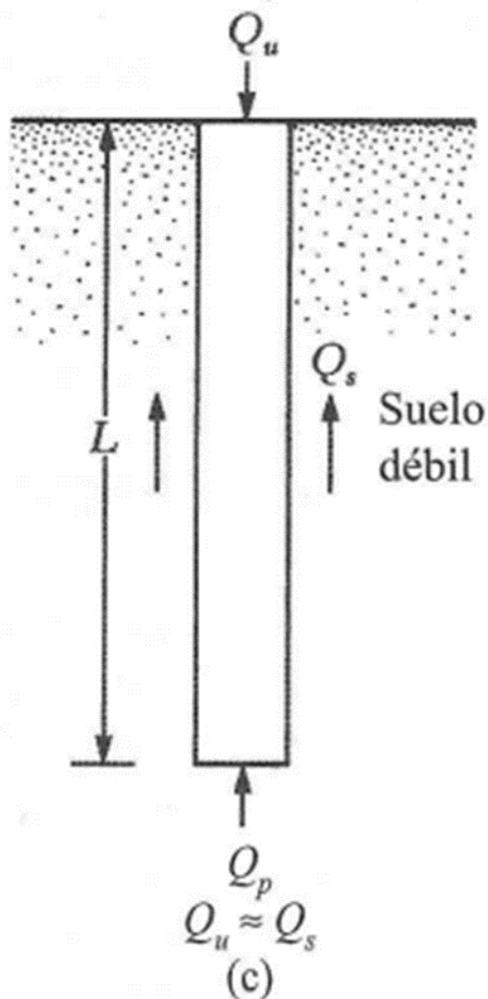
Para calcular esta capacidad de carga última del pilote de fricción, Borja (2016) determina:

La capacidad de carga última Q_u de un pilote está dado por la ecuación, $Q_u = Q_p + Q_f$ (p. 19). Donde “ Q_p = capacidad de carga de la punta del pilote, Q_f = Resistencia por fricción superficial generada en la interfaz suelo-pilote. (Borja, 2016, p. 19)

Como se ha mencionado en citas anteriores, cuando no hay una base sólida donde cimentarse la capacidad en la punta se vuelve inferior a la capacidad

del fuste, por lo que Borja (2016) considera que para el cálculo de la carga fricción
“La resistencia por fricción superficial de un pilote se expresa como $Q_f = \Sigma P \cdot \Delta L \cdot f$ ”
(p. 20). Considerando “ $P =$ Perímetro de la sección del pilote, $\Delta L =$ Longitud
incremental del pilote sobre la cual P y f se consideran constantes, $f =$ Resistencia
unitaria por fricción a cualquier profundidad Z ” (Borja, 2016, p. 20).

Figura 1. Pilotes de fricción



Fuente: Braja (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica.

Aun con estas indicaciones el desempeño que tendrá la cimentación con pilotes de fricción depende de las propiedades que tenga el suelo, se debe de contar con estudios que determinen estas variables, y bajo estas variables se determina la longitud que debe tener el pilote, y calcular de la mejor medida la fricción entre el cimiento y el edificio.

7.4. Coeficiente de balasto

Núñez (2014), describe que para el cálculo del coeficiente del balasto se necesita “tiene bastante incidencia la profundidad a la cual se desea determinar el coeficiente y el diámetro del pilote” (p. 16), por lo que se apoya de Bowles (1996) citado por Núñez (2014) define al coeficiente de balasto como:

Establece que la constante de balasto horizontal, K_h , viene dada por la expresión, $k_h = A_h + [B_h * Z]^n$, Con $A_h = F_w1 * C_m * C * [c * N_c + 0.5 * [\gamma * N]_{\gamma}]$, z : profundidad de la capa que se mide a partir del inicio del suelo colaborante, c : cohesión del suelo, ϕ : ángulo de fricción interna del suelo. (Núñez, 2014, p. 16)

Dependiendo del peso del edificio que se diseñe, estas variables presentan variaciones en la cantidad de pilotes que se tengan que diseñar es importante establecer los efectos que trae al diseñarse los pilotes en grupos. Para determinar los efectos ocurridos en los grupos de pilotes, se necesita expandir este tema en distintos supuestos de cómo se comportarán los pilotes bajo estas variables.

7.5. Características en los pilotes cimentados en grupos

Braja (2001), determina lo siguiente con respecto al diseñarse en grupo los pilotes “Idealmente, los pilotes en un grupo deben espaciarse de manera que la capacidad de carga del grupo no sea menor que la suma de sus capacidades individuales” (p. 542), lo que “En la práctica, la separación mínima centro a centro de los pilotes, d , es $2.5D$ y en situaciones ordinarias es aproximadamente de entre $3D$ y $3.5D$ ” (Braja, 2001, p. 542).

Lo que indica que la cantidad de pilotes, estos al estar muy cerca uno del otro puede reducir la carga por la cual son diseñados que deben de soportar, esto provoca que se tenga en consideración. Braja (2001), define la: La eficiencia de la capacidad de carga de un grupo de pilotes se define como: $n = Q_g(u) / (\sum Q_u)$ ” (p. 542). Donde, “ n = eficiencia del grupo, $Q_g(u)$ = capacidad de carga última del grupo de pilotes, Q_u = capacidad de carga última de cada pilote sin el efecto de grupo. (Braja, 2001, p. 542)

Alva (2021), calculó el asentamiento que sufren los pilotes al cimentarse en grupo como “una aproximación al asentamiento de un grupo de pilotes en suelo granular en base al asentamiento de un pilote individual, donde $\Delta =$ asentamiento del grupo de pilotes / asentamiento del pilote individual” (p. 13).

La cantidad de pilotes requeridos es una variable que se determina con las características del edificio, su peso y rigidez, donde no se puede prescindir de un diseño y análisis de los pilotes cuando se establezcan en conjuntos y no separados, otra variable fundamental en la función de los pilotes es la fricción negativa por lo que se requiere del abordamiento de esta variable.

7.6. Fricción negativa

Pineda et al. (2016) la define como “Todo movimiento relativo entre el suelo y el pilote produce esfuerzos cortantes en la interfaz suelo-pilote. Los esfuerzos cortantes descendentes se denominan fricción negativa y los ascendentes fricción positiva” (p. 2).

Al describir las variables que afectan los pilotes cuando se diseñan en grupos, tanto como la fricción negativa como la eficiencia, son variables que determinan un comportamiento entre el suelo y el edificio, entonces se necesita analizar bajo parámetros ya establecidos. En la actualidad se cuenta con programas que pueden modelar el comportamiento de las variables con respecto a los pilotes.

7.7. Modelación por SAP200

Se considera el uso de SAP200 para analizar el comportamiento suelo-estructura, Mata (2015) describe como se podrá analizar “En el modelado de la estructura con ISE, como se ha mencionado anteriormente se consideraron en general las mismas características de la estructura fija” (p. 83), considerando “modificando su empotramiento en la base por resortes ajustados a través de funciones de impedancia que consideran el sistema suelo-fundación” (Mata, 2015, p. 83).

Bajo estas características se desea modelar el comportamiento que tengan los pilotes bajo las variables que se describieron durante el desarrollo de este marco, se necesita definir de los métodos para obtener los parámetros y las características que posea el suelo.

7.8. Métodos para obtener las propiedades del suelo

Existen distintos métodos para obtener las propiedades mecánicas de suelo, y con estos conocer las características que poseen, estos métodos permiten determinar estas propiedades, los cuales son:

7.8.1. Ensayo SPT

Gow (1902), citado por Barrios (2019), menciona que “desarrolló la práctica de hincar en el suelo con un tubo de 1 pulg. de diámetro exterior para obtener muestras, marcando así el inicio del muestreo dinámico de los suelos” (p. 24).

7.8.2. Ensayo CPT

Al igual otro método para la obtención de resultados Rebata (2021) describe este método:

El ensayo de CPT o llamado también prueba de penetración de cono o “cono holandés” en principio consiste en empujar en el suelo una punta cónica (con ángulo de apertura de 60°) y con un área de la sección transversal del cono de 10 cm² a una velocidad constante de 20 mm/s. (p. 10)

Estos métodos son practicados por separado, pero poseen características y funciones que, aunque por separado describen las propiedades del suelo, con respecto al uso se pueden usar individualmente o hacerse ambos, ya que como se ha mencionado cada uno analiza el suelo con mayor o menor detalle.

Figura 2. **Ejemplo de ensayo CPT**



Fuente: Rebata (2021). Aplicación del ensayo MASW para la determinación de las velocidades de ondas de corte y correlaciones con el ensayo CPT.

Para finalizar, al tener el conocimiento de las variables y definir su contribución en el diseño y después su respectivo análisis de los pilotes de fricción, se puede definir el comportamiento de los pilotes al cimentarse sobre suelos piroclástico.

7.8.3. Hipótesis

. La incorporación de pilotes en suelos piroclásticos se espera que reporte un asentamiento (diferencial, primario) entre 15 y 30 cm.

Tabla I. Definición de variables

Variable	Definición	Definición Operacional
Pilotes de fricción	Pilote de Fricción o flotante transmite cargas a un cierto espesor de suelo relativamente blando mediante fricción desarrollada sobre la superficie lateral del pilote, a lo largo de la longitud de este.	Longitud: es una magnitud física que permite marcar distancias entre dos puntos, su unidad de medida es el metro (m). Diámetro: es la cuerda que pasó por el centro del círculo, su unidad de medida es el metro (m). Capacidad de carga: es la capacidad que se deriva de la fricción superficial entre la superficie del pilote y el suelo adyacente. Su indicador es el N o $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$.
Suelos piroclásticos	Se refiere a la roca formada por la acumulación y consolidación de estos materiales volcánicos	Ángulo de fricción: es una propiedad de los materiales granulares, se relaciona con el ángulo de reposo o el ángulo máximo posible para la pendiente del material granular. Su indicador es en Grados ($^{\circ}$). Cohesión: es la atracción entre partículas, originada por las fuerzas moleculares y las películas del agua. Su indicador es kg/cm^2 .

Continuación tabla I.

Variable	Definición	Definición Operacional
Fricción negativa	Fuerza de fricción desarrollada en el perímetro de una pila o pilote, o de cualquier otra estructura enterrada en el suelo que tiende a arrastrarla hacia abajo. Este tipo de fuerza frecuentemente se desarrolla en las masas de suelo en procesos de consolidación.	<p>Capacidad de carga: las cargas de fricción negativa inducidas son las que tienden a reducir la capacidad portante del pilote. Su indicador es el N o $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$.</p> <p>Asentamiento: son deformaciones en el suelo debido a las cargas transmitidos por las deformaciones. Su indicador es cm o mm.</p>

Fuente: Elaboración propia.

8. METODOLOGÍA

Esta investigación busca determinar el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos, la investigación tendrá un enfoque cuantitativo experimental de alcance descriptivo con una temporalidad transversal, porque los datos se tomarán en un único momento de tiempo y que se basa en un método hipotético-deductivo por medio la exploración del suelo y analizarlo bajo la hipótesis ya establecida y verificar el diseño de los pilotes de fricción por medio de SAP2000.

Para iniciar esta investigación buscará respaldarse con los conocimientos que ofrece al haber abordado el planteamiento del problema que requiere este estudio y responder las preguntas con una hipótesis establecida, con unos objetivos general y específicos propuestos, con la justificación, los alcances del estudio y teniendo una definición teórica de las variables que se investigaron en el marco teórico, con esto se desea desarrollar una investigación con las siguientes fases de desarrollo.

8.1. Fase 1 investigación de campo del suelo

La exploración del subsuelo en el que se pretende construir una estructura debe realizarse antes de empezar a diseñar una cimentación profunda, se requiere de una indagación en los métodos que proporcione información detallada de las propiedades del suelo. Así con el fin de obtener una secuencia lógica que permita obtener la calidad que requiera diseñar los pilotes.

8.1.1. Estudios geotécnicos

Para el desarrollo de la investigación que pretende diseñar una cimentación ideal que sostenga la estructura, se requiere de la exploración del subsuelo para obtener resultados y una interpretación de las características y comportamiento del suelo. Esta exploración debe de proporcionar información sobre las condiciones estratigráficas del suelo, como las propiedades mecánicas del suelo (resistencia, compresibilidad y permeabilidad), con el fin de realizar el diseño racional de la cimentación.

8.1.2. Exploración en el campo

Para el planteamiento de la exploración en el campo se debe de tener como objetivo determinar las condiciones del suelo donde se va a cimentar la estructura, estas condiciones son la profundidad, espesor, la extensión de cada uno de los estratos, si existe algún estrato de roca a una profundidad razonable. Ahora que se definió que se tiene que investigar las propiedades que se buscan del suelo es importante determinar entre los métodos que se tienen en el medio para la exploración del suelo.

8.1.3. Penetrómetro estándar SPT

El penetrómetro estándar es un tubo normalizado que se hincan a percusión, el tubo normalizado tiene una pared gruesa partido longitudinalmente, en un extremo cuenta con una zapata de acero endurecido y una cabeza que lo une al extremo de la columna de perforación. El procedimiento consta de hincar el penetrómetro a una profundidad de 45cm, este penetrómetro tiene 7.5cm de diámetro, en cada tramo de 15cm se cuenta el número de golpes necesarios para introducir el penetrómetro. Con los numero de golpes que se necesitaron para

introducir cada tramo y tomando como base el sistema de clasificación SUCS, se pueden definir los parámetros del suelo.

8.1.4. Cono holandés tipo eléctrico CPT

El cono holandés utiliza la presión estática para hincarse, para esto tiene incorporadas celdas instrumentadas con deformímetros eléctricos, que permiten la medición simultánea de las fuerzas necesarias para hincar la punta cónica de 60 grados que posee, esta punta tiene un ángulo de ataque de 3.60cm de diámetro y una funda cilíndrica de fricción que también tiene 3.60cm de diámetro y una longitud de 13.25cm. Para hincarse de forma dinámica se utiliza un mecanismo hidráulico que aplica 2.5, 10 y 20T de fuerza axial. La velocidad de hincado es de 2cm/s. La interpretación de este método se realiza a través de la gráfica de la resistencia de punta y fricción de este elemento, que actualmente se procesa por medio de computadoras. Los parámetros esperados al clasificar los suelos son a través de la correlación empírica, que se cuenta con la medición de la resistencia de la punta y fricción.

8.2. Fase 2 investigación teórica inicial

Para empezar con la investigación teórica que sustente el estudio que se está realizando, que es el de diseñar pilotes de fricción se tendrá que recurrir a normativas internacionales como nacionales, entre la normativa internacional que respalde este estudio está el ACI 318S-14, precisamente en el capítulo 9, y a nivel nacional se tiene la normativa NSE, más preciso el NSE-7.1. También se contará con el estudio realizado por otros autores especializados en el campo del diseño de cimentaciones profundas, una base documental que de soporte a las técnicas y metodologías que se necesitan para alcanzar los objetivos de esta investigación.

8.3. Fase 3 Diseño de pilotes

En esta fase se diseñará la cimentación profunda y esta inicia con la selección de aquellos elementos que sean compatibles con la estratigrafía y propiedades mecánicas del suelo, debe considerarse que esta cimentación debe de satisfacer la funcionalidad de la estructura y una seguridad adecuada contra fallas.

8.3.1. Estimación de la longitud del pilote

En esta etapa se considerará el tipo de pilote a usar, según el enfoque que tiene esta investigación, se desarrollara el estudio en los pilotes de fricción, estos pilotes se hincan en materiales blandos a profundidades específicas. Se estima la carga última del pilote con la siguiente expresión:

$$Q_u = Q_p + Q_f$$

Donde la carga Q_p es la carga en la punta del pilote, esta se despreciará por lo que la mayor parte de la resistencia se deriva de la fricción superficial.

8.3.2. Resistencia por fricción del pilote, Q_f

En esta etapa se determina la resistencia por fricción superficial, esta se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q_f = \sum p \cdot \Delta L \cdot f$$

Donde:

Σp = Perímetro de la sección del pilote, ΔL = Longitud incremental del pilote donde la carga y la f se consideran constantes, F = resistencia unitaria por fricción a cualquier profundidad z .

8.4. Fase 4 modelación de las variables en SAP2000

Para esta fase el análisis del comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos se hará en el programa de SAP2000, se ha elegido este programa por estar basado en el método de elementos finitos, donde la característica principal es el modelado, análisis y diseño de estructuras simples y complejas. Lo que permite modelar por medio de elementos *frame, shell, solid*, cualquier situación de diseño, por medio del modelado y análisis estructural de forma integral considerando la presencia del suelo a través de la rigidez lateral, lo que esta metodología se denomina con la interacción suelo-estructura.

8.4.1. Capacidad de carga en grupos de pilotes

Cabe resaltar que, en las cimentaciones, los pilotes se colocan en grupos que relativamente se colocan con poca separación entre ellos, por lo que se necesita considerar la acción del grupo de pilotes, esto es más importante cuando se usan pilotes de fricción. Como se detallará en la siguiente fase el comportamiento de los pilotes bajo las cargas de la estructura. Por lo que se busca que la capacidad del grupo es la suma de la capacidad de carga de la base de la cimentación, más la resistencia a esfuerzo cortante a lo largo de las caras verticales del grupo que forma la cimentación.

8.4.2. Método para realizar la prueba de los pilotes de fricción.

Para determinar el comportamiento de los pilotes de fricción se realizará por medio del programa SAP2000, por lo que se diseñara un edificio hipotético que le proporcione cargas de la estructura a la cimentación, esta estructura para proporcionarle las condiciones críticas a la cimentación será un edificio de más de 10 niveles, que le proporcione un gran peso a los pilotes de fricción.

Con lo expuesto anteriormente, se requiere emular el comportamiento de los pilotes de fricción bajo cargas proporcionadas por el edificio, y luego variar la cantidad de pilotes bajo distintas pruebas, y como se comportarán en grupos la cimentación, para realizar el análisis se cambiarán las distancias entre los pilotes, para realizar este estudio se requerirá de la aplicación del Método de Simulación de Monte Carlo, que genera una base de datos de todas las posibles variantes entre la distancia de los pilotes, se abarcará más de este método en el capítulo 10. Bajo estos métodos se buscará determinar cómo afectará el asentamiento a la estructura bajo las variables analizadas durante las pruebas.

8.4.3. Método Winkler

Este método propone relacionar el estudio del suelo con la interacción con la estructura, describe la superficie del terreno como un conjunto infinito de resortes situados a lo largo de la cimentación, la constante de deformación de cada resorte es K_s , resultado del cociente entre la presión de contacto y el desplazamiento vertical. Y resulta ser un método que junto al programa de SAP2000 emula las condiciones de la interacción suelo-estructura, para el análisis y posteriores resultados de esta investigación.

8.5. Fase 5 análisis de resultados

Con la obtención de los resultados del estudio del suelo, con el diseño de la cimentación profunda con las propiedades y características de los suelos piroclásticos, y el análisis del desempeño de los pilotes en SAP2000, se recabarán y tabularán los datos obtenidos haciendo uso de gráficas para analizar los resultados obtenidos.

8.5.1. Redacción y organización de las conclusiones

Al analizar los resultados obtenidos durante el desarrollo de estudio, junto con los objetivos de la investigación se contestará las preguntas abordadas durante el planteamiento del problema y se establecerán las conclusiones de esta investigación.

8.5.2. Redacción del reporte final de la investigación

Como fase final se realizará la redacción del informe de tesis que detallara la investigación y los resultados obtenidos, y la redacción de un artículo científico como solicitud de la Escuela de postgrado de la Facultad de ingeniería, y después de ser analizados serán publicados y presentados a la brevedad posible.

9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Luego de obtener los datos obtenidos durante la etapa de modelación en el programa de SAP2000, se realizará el análisis estadístico inferencial, que relaciona las variables propuestas durante la hipótesis, la cual permitirá evaluar el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos con respecto a la distancia entre ellos.

9.1. Ordenamiento y tabulación de los datos obtenidos

Con los datos obtenidos del programa SAP2000, se ordenarán y tabularan en el programa de Excel, por lo cual, permitirá una manipulación de los datos obtenidos durante la fase de modelado computación

9.1.1. Análisis estadístico de los resultados

Dado que la hipótesis de esta investigación es de carácter descriptivo y con un enfoque cuantitativo se utilizará la técnica inferencial dado que la pregunta de investigación depende de solo una variable que es la propiedad y característica del suelo, para el análisis de estas variables se recurrirá a la aplicación de Método de Simulación de Monte Carlo para analizarlos por medio de la prueba de normalidad.

Con estos métodos se esperará que al relacionar las características de los suelos piroclásticos con el diseño de pilotes y luego generar una base de datos con la variación de las distancias entre pilotes, determinar cómo variaría el asentamiento total que sufrirá la estructura.

10. ÍNDICE PARA EL INFORME FINAL

Avanzando con el informe, se propone el índice que representa la estructura y el contenido de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. ESTUDIO Y EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO

1.1. Estudios geotécnicos

1.1.1. Etapas de la exploración geotécnica

1.1.2. Investigación preliminar

1.1.3. Recorrido de campo

1.2. Investigación geotécnica

1.2.1. Exploración, muestreo y pruebas de campo

1.2.2. Penetrómetro estándar SPT

1.2.3. Cono holandés tipo eléctrico CPT

1.2.4. Ensayo de laboratorios

2. DISEÑO DE PILOTES DE FRICCIÓN

2.1. Estimación de la longitud del pilote

2.1.1. Pilotes de fricción

2.1.2. Ecuaciones para estimar la capacidad de un pilote

2.1.3. Resistencia por fricción

3. ANÁLISIS DE PILOTES DE FRICCIÓN CON EL PROGRAMA SAP2000

3.1. Análisis de la capacidad de carga en grupos de pilotes

3.1.1. Eficiencia de los grupos de pilotes

3.2. Análisis del efecto de la fricción negativa

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

11. CRONOGRAMA

El desarrollo y ejecución del proyecto de investigación se realizará en 42 semanas, y se describe de forma cronológica por medio del cronograma de trabajo que describa las actividades que permitan alcanzar los objetivos propuestos.

Tabla II. Cronograma de actividades.

Actividades a ejecutar	Duración (semanas)	Comienzo	Final
Desarrollo del perfil de investigación	10		
Planteamiento del problema	4	Mié, 01/06/22	Mié, 29/06/22
Objetivos de la investigación	2	Mié, 29/06/22	Mié, 13/07/22
Alcances de la investigación	4	Mié, 13/07/22	Mié 10/08/22
Desarrollo del protocolo de investigación	10		
Antecedentes de la investigación	3	Sáb, 20/08/22	Sáb, 10/09/22
Justificación	1	Sáb, 10/09/22	Sáb, 17/09/22
Redacción del Marco teórico	3	Sáb, 17/09/22	Sáb, 08/10/22
Hipótesis y Metodología	2	Sáb, 08/10/22	Sáb, 22/10/22
Redacción final del protocolo	1	Sáb, 22/10/22	Sáb, 29/10/22
Exploración y estudio geotécnica del suelo	4		
Observación geológica y topografía del lugar	1	Lun, 07/08/23	Lun, 14/08/23
Realizar pruebas de penetración SPT	1	Lun, 14/08/23	Lun, 21/08/23
Estudio y análisis de las pruebas de penetración	2	Lun, 21/08/23	Lun, 04/09/23
Diseño de los pilotes de fricción	2		
Desarrollo del diseño de un edificio de gran altura	1	Lun, 04/09/23	Lun, 11/09/23
Desarrollo del diseño de los pilotes de fricción	1	Lun, 11/09/23	Lun, 18/09/23
Modelamiento de las variables en SAP	5		
Modelado de las variables en SAP2000	3	Lun, 18/09/23	Lun, 23/10/23
Procesamiento y análisis de datos obtenidos	2	Lun, 23/10/23	Lun, 06/11/23
Procesamiento por métodos estadísticos de las variables	11		
Utilización del método de Simulación de Monte Carlo	3	Lun, 06/11/23	Lun, 27/11/23
Análisis de resultado por la prueba de normalidad	1	Lun, 27/11/23	Lun, 04/12/23
Análisis de datos de los resultado para concluir la hipótesis	2	Lun, 04/12/23	Lun, 18/11/23
Presentación de resultados	2	Lun, 18/11/23	Lun, 08/01/24
Presentación y finalización de informe	3	Lun, 08/01/24	Lun, 22/01/24

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La investigación se realizará con una inversión propia, considerando realizar la visita técnica al sitio donde se realizará el análisis, esto con la finalidad de explorar el área. Luego de la exploración del área se iniciarán los ensayos SPT, con el asesoramiento de personal capacitado en el área, luego se hará el estudio de las condiciones geológicas de la zona, esta inversión inicialmente será propia, aunque cabe la posibilidad de buscar un inversor interesado en la investigación.

Para el análisis de la investigación se utilizará el programa SAP2000, y para la recolección y tabulación de los datos en Excel, que procesarán y analizarán la información. Para gastos de administración como los son los impresiones y costos varios destinados al informe final serán de financiamiento propio. Se considera factible la investigación ya que alcanza un costo total de Q. 33,600.00, los cuales serán de financiamiento propio.

Tabla III. **Costos relacionados con la investigación.**

ACTIVIDAD	Costo	Tipo de financiamiento
Honorarios de asesor		
Visitas de Campo	Q4,000.00	Propio
Ensayos SPT	Q15,000.00	Propio
Estudio de las condiciones geológicas de la zona	Q3,000.00	Propio
Procesamiento de los datos geológicos del suelo	Q2,000.00	Propio
Utilización del programa de SAP2000 y Excel por un mes	Q3,000.00	Propio
Procesamiento y análisis de los datos obtenidos	Q2,500.00	Propio
Informe final	Q4,100.00	Propio
Total	Q33,600.00	

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

1. Aguilar, H., & Avilés, J. (18 de abril de 2003). Influencia de pilotes de fricción en la interacción dinámica suelo–estructura. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
2. Aguilar, Z., & Alva, J. (1991). Microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa. *VI Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*. Lima.
3. Alva, J. (2021). Cimentaciones profundas. *Comite peruano de mecánica de suelos, fundaciones y mecánica de rocas*.
4. Barrios, J. (2019). *Correlación de los resultados con el ensayo de penetración estándar (spt) y penetrómetro dinámico ligero (dpl) en suelos del p.j. Wilmer Fernández Malca-Chiclayo*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo.
5. Bernardo, I., & Ramirez, R. (2021). *Aplicación y análisis de un modelo dinámico con interacción suelo – estructura (ise) para cimentaciones con pilotes de la sede central del gobierno en la ciudad de Pucallpa – Ucayali*. Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa, Perú.
6. Borja, A. (2016). *Cálculo de pilotes por fricción y proceso constructivo de pilotes*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

7. Braja, D. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Sacramento: Thomson Learning.
8. Camacho, P., & Mediavilla, L. (2019). *Diseño geotécnico – estructural de pilotes y pilas mediante el método matricial en diversas estratigrafías y niveles freáticos en Ecuador*. Quito, Ecuador.
9. Campos, E. (30 de agosto de 2020). *Inesa-tech*. Obtenido de <https://www.inesa-tech.com/blog/influencia-coeficiente-balasto-diseno-cimentacion>
10. Cano, M. (2018). *Análisis comparativo de capacidad de carga y asentamiento de pilotes por métodos analíticos y modelado numérico*. Universidad nacional autónoma de México, Ciudad de México, México.
11. Carrillo, F. (2016). *Proceso Constructivo de una Vivienda de 2 Plantas, con Cimentación Semicompensada, ubicada en la Provincia del Guayas, Avenida Samborondón Este, Urbanización entre Lagos*. Univerdidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
12. Garza, L. (2004). *Diseño de estructuras de cimentacion de acuerdo a nsr-10*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
13. Hernández, V. (218). *Evaluación geotécnica de la vulnerabilidad sísmica en puentes empleando la interacción dinámica suelo-estructura*. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Cuba.
14. Jiménez, N. (2018). *Cimentación en los Edificios de Gran Altura*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Sevilla, España.

15. Laporte, G., & Rodríguez, J. (2011). Cimentaciones profundas apoyadas en rocas blandas. *Xi seminario de ingeniería estructural y sísmica San José, Costa Rica*.
16. Mata, R. (2015). *Efectos de la acción sísmica, en edificaciones regulares de concreto armado considerando la interacción suelo-estructura de manera explícita para suelos arenosos y arcillosos*. Universidad de Carabobo, Bábula, Venezuela.
17. Méndez, W. (2019). *Evaluación estructural del sistema de cimentación con pilotes para edificios altos en trujillo 2019*. Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú.
18. Núñez, D. (2014). *Análisis comparativo de modelación de pilotes con métodos de coeficiente de balasto y elementos finitos*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Valdivia.
19. Orellana, J., & Paitán, J. (2020). *Determinación y diseño del tipo de cimentación profunda con pilotes en puentes sobre suelos arenosos en Tumbes mediante un modelo computarizado*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
20. Padilla, E. (2019). Problemas Geotécnicos en la Construcción de una Obra Subterránea en Guadalajara, Jalisco, México. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*.
21. Pertuz, O., & Vega, D. (2021). *Evaluación comparativa de los métodos analíticos de diseño de pilotes con respecto a las pruebas de carga en los*

barrios manga, bocagrande y castillogrande de la ciudad de cartagena de indias. Universidad de cartagena, cartagena de indias, Colombia.

22. Pineda, V., Guichard, G., & Rodríguez, J. (Noviembre de 2016). Fricción negativa en grupos de pilotes en la zona de lacustre de la Ciudad de México. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería, Geotécnica.*
23. Rebata, C. (2021). *Aplicación del ensayo masw para la determinación de la velocidades de ondas de corte y correlaciones con el ensayo cpt.* Pontificia universidad católica del Perú, Lima, Perú.
24. Sardón, T., & Sasaky, A. (2020). *Estudio comparativo entre la capacidad de carga de pilotes excavados, estimados mediante métodos analíticos, semiempíricos y pruebas de carga. Aplicaciones en suelos gravosos y arcillosos en la costa del Perú.* Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
25. Tena, A. (Mayo de 2019). Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras.*
26. Aguilar, H., & Avilés, J. (18 de abril de 2003). Influencia de pilotes de fricción en la interacción dinámica suelo–estructura. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.*
27. Aguilar, Z., & Alva, J. (1991). Microzonificación sísmica de la ciudad de arequipa. *VI Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones.* Lima.

28. Alva, J. (2021). Cimentaciones profundas. *Comite peruano de mecanica de suelos, fundaciones y mecanica de rocas.*
29. Barrios, J. (2019). *Correlación de los resultados con el ensayo de penetración estándar (spt) y penetrómetro dinámico ligero (dpl) en suelos del p.j. wilmer fernández malca-chiclayo.* Universidad católica Santo Toribio de mogrovejo, Chiclayo.
30. Bernardo, I., & Ramirez, R. (2021). *Aplicación y análisis de un modelo dinamico con interacción suelo – estructura (ise) para cimentaciones con pilotes de la sede central del gobierno en la ciudad de pucallpa – ucayali.* Universidad nacional de ucayali, Pucallpa, Perú.
31. Borja, A. (2016). *Cálculo de pilotes por fricción y proceso constructivo de pilotes.* Universidad mayor de san andrés, La Paz, Bolivia.
32. Braja, D. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica.* Sacramento: Thomson Learning.
33. Camacho, P., & Mediavilla, L. (2019). *Diseño geotécnico – estructural de pilotes y pilas mediante el método matricial en diversas estratigrafías y niveles freáticos en Ecuador.* Quito, Ecuador.
34. Campos, E. (30 de agosto de 2020). *Inesa-tech.* Obtenido de <https://www.inesa-tech.com/blog/influencia-coeficiente-balasto-diseno-cimentacion>.

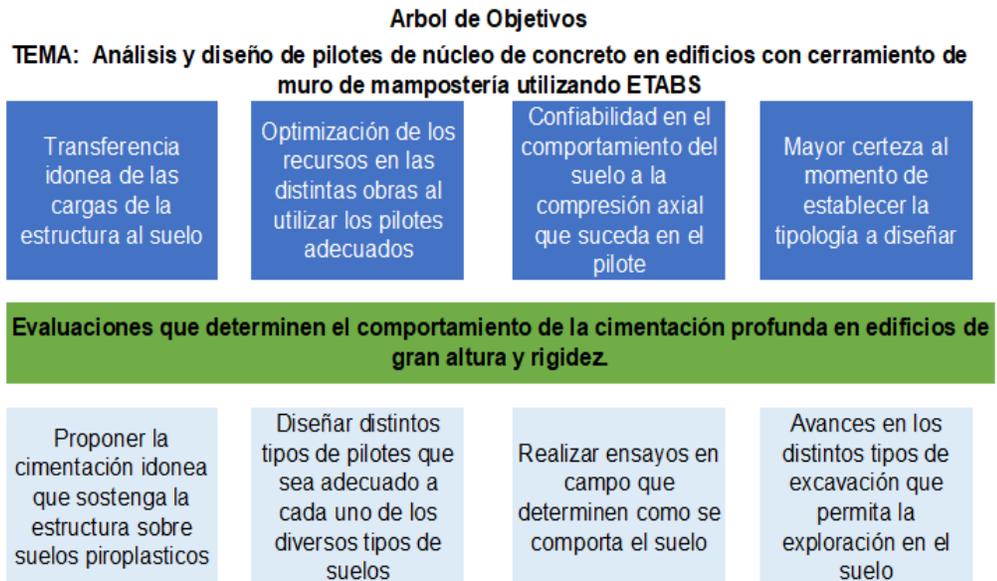
35. Cano, M. (2018). *Análisis comparativo de capacidad de carga y asentamiento de pilotes por métodos analíticos y modelado numérico*. Universidad nacional autónoma de México, Ciudad de México, México.
36. Carrillo, F. (2016). *Proceso Constructivo de una Vivienda de 2 Plantas, con Cimentación Semicompensada, ubicada en la Provincia del Guayas, Avenida Samborondón Este, Urbanización entre Lagos*. Univerdidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
37. Garza, L. (2004). *Diseño de estructuras de cimentacion de acuerdo a nsr-10*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
38. Hernández, V. (218). *Evaluación geotécnica de la vulnerabilidad sísmica en puentes empleando la interacción dinámica suelo-estructura*. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Cuba.
39. Jiménez, N. (2018). *Cimentación en los Edificios de Gran Altura*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Sevilla, España.
40. Laporte, G., & Rodríguez, J. (2011). *Cimentaciones profundas apoyadas en rocas blandas. Xi seminario de ingeniería estructural y sísmica San José, Costa Rica*.
41. Mata, R. (2015). *Efectos de la acción sísmica, en edificaciones regulares de concreto armado considerando la interacción suelo-estructura de manera explícita para suelos arenosos y arcillosos*. Universidad de Carabobo, Bábula, Venezuela.

42. Méndez, W. (2019). *Evaluación estructural del sistema de cimentación con pilotes para edificios altos en trujillo 2019*. Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú.
43. Núñez, D. (2014). *Análisis comparativo de modelación de pilotes con métodos de coeficiente de balasto y elementos finitos*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Valdivia.
44. Orellana, J., & Paitán, J. (2020). *Determinación y diseño del tipo de cimentación profunda con pilotes en puentes sobre suelos arenosos en Tumbes mediante un modelo computarizado*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
45. Padilla, E. (2019). Problemas Geotécnicos en la Construcción de una Obra Subterránea en Guadalajara, Jalisco, México. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*.
46. Pertuz, O., & Vega, D. (2021). *Evaluación comparativa de los métodos analíticos de diseño de pilotes con respecto a las pruebas de carga en los barrios manga, bocagrande y castillogrande de la ciudad de cartagena de indias*. Universidad de cartagena, cartagena de indias, Colombia.
47. Pineda, V., Guichard, G., & Rodríguez, J. (Noviembre de 2016). Fricción negativa en grupos de pilotes en la zona de lacustre de la Ciudad de México. *XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería, Geotecnia*.
48. Rebata, C. (2021). *Aplicación del ensayo masw para la determinación de la velocidades de ondas de corte y correlaciones con el ensayo cpt*. Pontificia universidad católica del Perú, Lima, Perú.

49. Sardón, T., & Sasaki, A. (2020). *Estudio comparativo entre la capacidad de carga de pilotes excavados, estimados mediante métodos analíticos, semiempíricos y pruebas de carga. Aplicaciones en suelos gravosos y arcillosos en la costa del Perú*. Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
50. Tena, A. (Mayo de 2019). Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*.
51. Torres, R. (2022). *Estudio y evaluación de la interacción de suelo-pilotes a tracción/compresión ante la solicitación sísmica, casos de pilotes inclinados (excéntricos). Verificación de requisitos de NCH2369 Actualizada*. Universidad de Chile, Universidad de Chile, Chile.
52. Urbina, R. (2004). *Guía para el diseño de pilotes*. Universidad de Piura, Piura, Perú.
53. Vicente, M. (2019). *Simulación del hincado de un pilote individual en un suelo granular por el método acoplado euleriano - lagrangiano*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

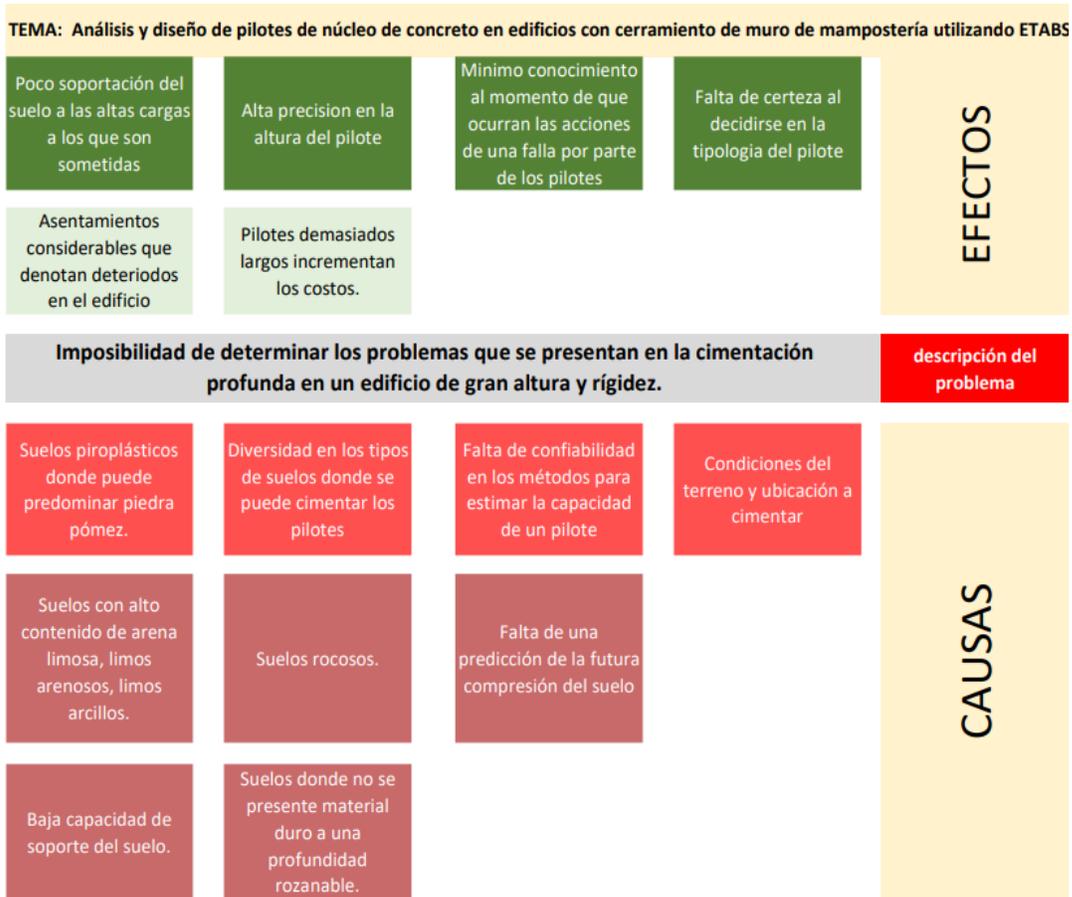
APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de objetivos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Matriz de consistencia

Problema General	Pregunta General	Objetivo General	Metodología	Hipótesis
Imposibilidad de determinar los problemas que se presentan en la cimentación profunda en un edificio de gran altura y rigidez.	¿Cuáles son las características que deben cumplir los pilotes de fricción para cimentarse en suelos piroclásticos?	Evaluar las características de los pilotes de fricción y su transferencia de cargas a suelos piroclásticos.	Estudio descriptivo de enfoque cuantitativo experimental de alcance descriptivo con una temporalidad transversal.	La incorporación de pilotes en suelos piroclásticos espera que reporte un asentamiento (diferencial, primario) entre 15 y 30 cm.
Problemas Específicos	Específicas	Específicos	Diseño de investigación	VARIABLES, ÍNDICES e indicadores.
Suelos piroclásticos donde puede predominar piedra pómez.	¿Cómo influye en el diseño de pilotes de fricción el módulo de balasto en suelos piroclásticos?	Calcular cómo influye el módulo de balasto en el diseño de pilotes de fricción en suelos piroclásticos.	Primera fase, exploración y estudio de las propiedades y características del suelo piroclásticos.	Suelos piroclásticos Pilotes de fricción Fricción negativa
Diversidad en los tipos de suelos donde se puede cimentar los pilotes.	¿Qué criterios se deben tomar en el diseño con respecto a los grupos de pilotes en suelos piroclásticos?	Determinar el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos al diseñarse en grupos.	Segunda fase, estudio y diseño de los pilotes de fricción.	
Falta de confiabilidad en los métodos para estimar la capacidad de un pilote.	¿Cómo afecta la fricción negativa al diseñarse los pilotes en grupos en suelos piroclásticos?	Determinar la influencia de la fricción negativa en los pilotes de fricción cuando se diseñen en grupos.	Tercera fase, Modelación de las variables de estudio por medio del programa SAP2000.	Longitud (m) Diámetro (m) Capacidad de carga (kg*m/s2) Angulo de fricción (°C) Cohesión (kg/cm2)
Condiciones del terreno y ubicación a cimentar Suelos con alto contenido de arena limosa, limos arenosos, limos arcillas.	¿Cómo se comportarán los pilotes de fricción en suelos piroclásticos al ser analizados con SAP2000?	Analizar en SAP2000 el comportamiento de los pilotes de fricción en suelos piroclásticos.	Cuarta y quinta fase, recopilación de los datos obtenidos y redacción de los resultados, ya la redacción del informe final.	

Fuente: elaboración propia.

