



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

Tema:

**Pilotes inyectados y reinyectados con lechada cementicia a partir de
columnas de grava excavadas.**

Autor:

Mite Naranjo, Eliot

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Civil**

Tutor:

Ing. Colón Gilberto Martínez Rehpani, M.Sc.

Guayaquil, Ecuador

4 de septiembre de 2024



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Certificación

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por Mite Naranjo, Eliot como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Civil.

Tutor



Firmado electrónicamente por:
**COLÓN GILBERTO
MARTINEZ REHPANI**

F. _____

Ing. Colón Gilberto Martínez Rehpani, M.Sc.

Director de la carrera



Firmado electrónicamente por:
**STEFANY ESTHER
ALCIVAR BASTIDAS**

F. _____

Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas, M.Sc.

Guayaquil, a los 4 días del mes de septiembre del año 2024.



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Declaración de Responsabilidad

Yo, Mite Naranjo, Eliot

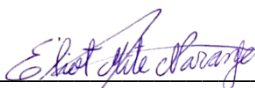
Declaro que:

El trabajo de titulación **Pilotes inyectados y reinyectados con lechada cementicia a partir de columnas de grava excavadas** previo a la obtención del título de Ingeniero Civil ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente, este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del trabajo de titulación referido.

Guayaquil, a los 4 días del mes de septiembre del año 2024.

El autor:

F. 
Mite Naranjo, Eliot



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL


Autorización

Yo, Mite Naranjo, Eliot

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación, en la biblioteca de la institución, del trabajo de titulación **Pilotes inyectados y reinyectados con lechada cementicia a partir de columnas de grava excavadas**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 4 días del mes de septiembre del año 2024.

El autor:

F. 
Mite Naranjo, Eliot



MITE_ELIOT_FINAL

4%
Textos sospechosos

< 1% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas

3% Idiomas no reconocidos (ignorado)

2% Textos potencialmente generados por la IA

| | | |
|---|--|---|
| Nombre del documento: MITE_ELIOT_FINAL.docx ID del documento: 8db523e3bd57a11ea0d787cce2065c7544768186 Tamaño del documento original: 20,42 MB Autores: [] | Depositante: Clara Catalina Glas Cevallos Fecha de depósito: 24/9/2024 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 24/9/2024 | Número de palabras: 19.887 Número de caracteres: 133.434 |
|---|--|---|

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

| N° | Descripciones | Similitudes | Ubicaciones | Datos adicionales |
|----|---|-------------|-------------|---|
| 1 | repositorio.ucsg.edu.ec http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/5372/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-149.pdf 15 fuentes similares | 1% | | Palabras idénticas: 1% (283 palabras) |
| 2 | Nathaly Freire, Juan Vega, P73.docx Nathaly Freire Juan Vega, P73 #156993 El documento proviene de mi grupo 12 fuentes similares | 1% | | Palabras idénticas: 1% (249 palabras) |
| 3 | repositorio.ucsg.edu.ec http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/14908/1/T-UCSG-PRE-MED-ENF-581.pdf 11 fuentes similares | 1% | | Palabras idénticas: 1% (215 palabras) |
| 4 | Documento de otro usuario #d913c5 El documento proviene de otro grupo 25 fuentes similares | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (196 palabras) |
| 5 | repositorio.ucsg.edu.ec http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11168/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-251.pdf 11 fuentes similares | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (178 palabras) |

Fuentes con similitudes fortuitas

| N° | Descripciones | Similitudes | Ubicaciones | Datos adicionales |
|----|--|-------------|-------------|--|
| 1 | aquadocs.org https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/4218/Descripción morfológica de la plata forma contin... | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (28 palabras) |
| 2 | alicia.concytec.gob.pe Descripción: Propuesta de Mejoramiento de suelos licuabl... https://alicia.concytec.gob.pe/u/find/index.php/Record/UUUC_c2087ae64975f6fb79e2775629c932b... | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (32 palabras) |
| 3 | repositorio.epnewman.edu.pe https://repositorio.epnewman.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12892/75/TRABAJO_DE_INV_MGM... | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (36 palabras) |
| 4 | bibdigital.epn.edu.ec https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23419/1/CD_12847.pdf | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (34 palabras) |
| 5 | aero.ing.unlp.edu.ar https://aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte Ultrasonido 2012.pdf | < 1% | | Palabras idénticas: < 1% (27 palabras) |

Fuente ignorada Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

| N° | Descripciones | Similitudes | Ubicaciones | Datos adicionales |
|----|--|-------------|-------------|---|
| 1 | Eliot Mite.docx Eliot Mite #ffaa4d El documento proviene de mi biblioteca de referencias | 75% | | Palabras idénticas: 75% (15.195 palabras) |

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

| | |
|---|---|
| 1 | https://www.gestionderiesgos.gob.ec/sgr-presenta-manual-practico-para-la-caracterizacion-geologica-y-sismica-de-guayaquil/ |
| 2 | http://www.scielo.org.ar/img/revistas/raga/v61n4/4a06f2.jpg |
| 3 | https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/2085/1/ULEAM-IC-0046.pdf |
| 4 | https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/42fa54a5-1195-4d56-b66f-b5d29a587c93/content |
| 5 | https://www.terratest.cl/wp-content/uploads/2020/02/Catalogo-Pilotes-terratest-columna-de-grava.pdf |

Agradecimiento

Agradezco a madre, quien me brindó todo su apoyo y estuvo ahí a pesar de los altos y bajos que tuve durante la carrera.

A mis hermanos, que estuvieron presentes y me alentaron para seguir y esforzarme más de lo que podía.

A mis amigos, Douglas, Einstein, Ricardo y Patricio, porque a pesar de no graduarnos juntos, siempre nos apoyamos de una forma u otra.

A una persona muy importante para mí, Milena, quien me dio todos los motivos para esforzarme día a día y avanzar no solo en mi carrera, sino también en mi vida personal.

A los amigos que conseguí tiempo después, Valeria, Frank, Isaac y Néstor, quienes me brindaron su amistad, me dieron consejos y me ayudaron cuando más lo necesitaba.

A mi jefe, el ingeniero Douglas, quien me brindó la oportunidad de colaborar en su empresa y me apoyó para culminar mis estudios.

A Leonardo, Enrique, Narcisa y Anthony, colegas de trabajo, por haber tenido paciencia conmigo y por extenderme la mano cuando más lo necesitaba.

Finalmente, mi más sincera gratitud a mi tutor, el ingeniero Gilberto Martínez, quien fue mi guía durante el proceso de tesis.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo de titulación a mi madre, Lupe Naranjo, el pilar más importante de mi vida, pues ella se esforzó año tras año para que yo llegara hasta este punto. Al igual que tú, sigo avanzando ante cualquier adversidad que se ponga en mi camino.

A mis hermanos, que de manera incondicional me aconsejaron y alentaron para seguir cuando ya no podía.

A mis abuelos maternos, que en paz descansen.

A la memoria de César Mite, mi padre, que en paz descanse. Sé que estás muy orgulloso de tu hijo por todo lo que está logrando.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil**



Firmado electrónicamente por:
**COLON GILBERTO
MARTINEZ REHPANI**

F. _____

Ing. Colón Gilberto Martínez Rehpani, M.Sc.

Tutor

Tribunal de sustentación



Firmado electrónicamente por:
**STEFANY ESTHER
ALCIVAR BASTIDAS**

F. _____

Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas, M.Sc.

Directora de la carrera



Firmado electrónicamente por:
**FRANCISCO JAVIER
GRAU SACOTO**

F. _____

Ing. Francisco Grau Sacoto, M.Sc.

Docente del área



Firmado electrónicamente por:
**CARLOS ANDRES GRAU
SACOTO**

Ing. Carlos Grau Sacoto, M.Sc.

Oponente

Índice de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 2 |
| Antecedentes | 2 |
| Justificación..... | 3 |
| Objetivo general | 4 |
| Objetivos específicos | 4 |
| 1 Capítulo I. Marco teórico | 5 |
| 1.1 Marco geológico de Guayaquil | 5 |
| 1.1.1 Suelos aluviales | 5 |
| 1.1.2 Complejo deltaico estuarino..... | 5 |
| 1.1.3 Cordillera Chongón Colonche | 6 |
| 1.1.4 Tipos de suelos | 8 |
| 1.1.5 Tipos de formaciones geológicas | 11 |
| 1.2 Marco sísmico | 11 |
| 1.2.1 Bordes convergentes o subducción de placas | 11 |
| 1.2.2 Plataforma continental e insular del Ecuador..... | 14 |
| 1.2.3 Formación del golfo de Guayaquil..... | 17 |
| 1.2.4 Megafalla Guayaquil-Dolores | 18 |
| 1.3 Tipos de cimentaciones | 20 |
| 1.3.1 Cimentaciones profundas | 21 |
| 2 Capítulo II. Fundamentos teóricos | 25 |
| 2.1 Pilotes inyectados | 25 |
| 2.2 Geotextil | 27 |
| 2.2.1 Clasificación de geotextiles..... | 28 |
| 2.2.2 Propiedades de los geotextiles | 32 |
| 2.3 Columna de grava..... | 33 |
| 2.3.1 Aplicaciones de la columna de grava..... | 34 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.2 | Beneficios del uso de columna de grava | 39 |
| 2.4 | Camisa o revestimiento del pilote | 40 |
| 2.4.1 | Funciones principales del revestimiento del pilote | 40 |
| 2.4.2 | Métodos constructivos | 41 |
| 2.5 | Inyección de lechada | 45 |
| 2.5.1 | Técnicas de inyección | 48 |
| 2.5.2 | Tipos de inyecciones | 50 |
| 2.6 | Proceso constructivo..... | 52 |
| 2.7 | Reinyección | 53 |
| 2.8 | Ecosonografía..... | 56 |
| 3 | Capítulo III. Propuesta de elemento constructivo para cimentación profunda .. | 59 |
| 3.1 | Pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia a partir de columnas de gravas excavadas | 59 |
| 3.1.1 | Proceso constructivo | 60 |
| 3.2 | Ensayos de laboratorio de la lechada cementicia | 68 |
| 3.2.1 | Diseño de lechada cementicia | 68 |
| 3.2.2 | Elaboración de lechada cementicia y llenado en moldes cilíndricos ... | 69 |
| 3.2.3 | Medición y rotura de cilindros | 72 |
| 3.2.4 | Resultados de los ensayos de laboratorio..... | 75 |
| 3.3 | Ensayos de laboratorio del material piedra-cemento..... | 80 |
| 3.3.1 | Granulometría de la piedra..... | 80 |
| 3.3.2 | Elaboración de cilindros..... | 82 |
| 3.3.3 | Medición y rotura de cilindros | 83 |
| 3.3.4 | Resultados de los ensayos de laboratorio..... | 85 |
| 3.4 | Tipo de geotextil..... | 86 |
| 3.5 | Fundición de un tramo de pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de gravas excavadas | 87 |

| | | |
|---|----------------------|----|
| 4 | Conclusiones | 93 |
| 5 | Recomendaciones..... | 94 |
| 6 | Referencias | 95 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>Mapa estratigráfico de la ciudad de Guayaquil.</i> | 2 |
| Figura 2 <i>Mapa geomorfológico de Guayaquil.</i> | 7 |
| Figura 3 <i>Placas convergentes oceánicas.</i> | 12 |
| Figura 4 <i>Placas convergentes oceánico-continentales.</i> | 13 |
| Figura 5 <i>Placas convergentes continental-continental.</i> | 13 |
| Figura 6 <i>Modelado digital del terreno marítimo de la continuidad morfológica entre las Islas Galápagos y la cordillera de Carnegie.</i> | 15 |
| Figura 7 <i>Perfil batimétrico entre Galápagos-Carnegie.</i> | 16 |
| Figura 8 <i>Interacción entre las placas Nazca y Cocos con la placa Sudamericana.</i> .. | 17 |
| Figura 9 <i>Ubicación geográfica del golfo de Guayaquil.</i> | 18 |
| Figura 10 <i>Inicio de megafalla Guayaquil-Dolores.</i> | 19 |
| Figura 11 <i>Tipos de cimentaciones con relación a la profundidad.</i> | 21 |
| Figura 12 <i>Tipos de pilotes de concreto colados in situ con ademe y sin ademe.</i> | 23 |
| Figura 13 <i>Pilotes de carga de punta y pilotes de fricción.</i> | 24 |
| Figura 14 <i>Esquema de cimentaciones de pilotes.</i> | 25 |
| Figura 15 <i>Tipos de pilotes.</i> | 26 |
| Figura 16 <i>Clasificación de geotextiles.</i> | 28 |
| Figura 17 <i>Geotextil tejido.</i> | 29 |
| Figura 18 <i>Geotextil no tejido.</i> | 30 |
| Figura 19 <i>Aplicaciones del geotextil no tejido.</i> | 30 |
| Figura 20 <i>Geotextil tejido y no tejido.</i> | 32 |
| Figura 21 <i>Distribución de las columnas de grava sobre una plataforma de transferencia.</i> | 33 |
| Figura 22 <i>Refuerzo.</i> | 34 |
| Figura 23 <i>Densificación.</i> | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 24 <i>Drenaje.</i> | 36 |
| Figura 25 <i>Aplicación de la columna de grava en terraplenes.</i> | 36 |
| Figura 26 <i>Columnas de grava en cimentación de un tanque de almacenamiento.</i> ... | 37 |
| Figura 27 <i>Distribución de columnas de grava en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP).</i> | 38 |
| Figura 28 <i>Instalación de columnas de grava en el mar.</i> | 39 |
| Figura 29 <i>Beneficios de las columnas de grava.</i> | 39 |
| Figura 30 <i>Método de vibro-sustitución para la instalación de columnas de grava.</i> | 42 |
| Figura 31 <i>Método de vibro-desplazamiento para la instalación de columnas de grava.</i> | 43 |
| Figura 32 <i>Colchón de materiales de aportación.</i> | 44 |
| Figura 33 <i>Ejecución de columnas de grava.</i> | 44 |
| Figura 34 <i>Método con banqueta de grava.</i> | 45 |
| Figura 35 <i>Equipos de inyección de lechada.</i> | 46 |
| Figura 36 <i>Inyección descendente.</i> | 49 |
| Figura 37 <i>Inyección ascendente.</i> | 50 |
| Figura 38 <i>Tratamiento de inyecciones según el trabajo.</i> | 51 |
| Figura 39 <i>Flujo de procesos de reinyección.</i> | 55 |
| Figura 40 <i>Proceso constructivo de la metodología a proponer, etapas 1 y 2.</i> | 60 |
| Figura 41 <i>Hincado de camisa metálica recuperable mediante presión hidráulica.</i> . | 61 |
| Figura 42 <i>Proceso constructivo de la metodología a proponer, etapas 3, 4 y 5.</i> | 61 |
| Figura 43 <i>Geotextil colocado dentro de la camisa metálica recuperable.</i> | 62 |
| Figura 44 <i>Armado estructural dentro de la camisa metálica.</i> | 62 |
| Figura 45 <i>Colocación de tubo de inyección de lechada de cemento.</i> | 63 |
| Figura 46 <i>Proceso constructivo de la metodología a proponer, etapas 6, 7 y 8.</i> | 63 |
| Figura 47 <i>Vaciado de gravas mediante embudo en armado del pilote.</i> | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 48 <i>Punta cerrada de la camisa metálica recuperable</i> | 64 |
| Figura 49 <i>Punta abierta de la camisa metálica recuperable</i> | 65 |
| Figura 50 <i>Proceso constructivo de la metodología a proponer</i> | 65 |
| Figura 51 <i>Detalle de la sección transversal del pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia construida</i> | 66 |
| Figura 52 <i>Grupos de pilotes colocados debajo de la zapata</i> | 67 |
| Figura 53 <i>Sistema radicular de un grupo de pilotes</i> | 67 |
| Figura 54 <i>Cimentación profunda de una edificación con grupos de pilotes trabajando con el sistema radicular en la punta</i> | 68 |
| Figura 55 <i>Cuantificación de cemento a utilizar</i> | 70 |
| Figura 56 <i>Cuantificación del agua</i> | 70 |
| Figura 57 <i>Cuantificación y mezclado de aditivo plastificante</i> | 71 |
| Figura 58 <i>Mezclado de la lechada cementicia</i> | 71 |
| Figura 59 <i>Llenado de moldes con lechada cementicia</i> | 72 |
| Figura 60 <i>Cilindros de lechada cementicia desmoldadas</i> | 72 |
| Figura 61 <i>Pesaje de cilindro compuesto de lechada cementicia</i> | 73 |
| Figura 62 <i>Medición de cilindros de lechada cementicia</i> | 73 |
| Figura 63 <i>Cilindro con lechada cementicia antes de la rotura</i> | 75 |
| Figura 64 <i>Cilindro con lechada cementicia después de la rotura</i> | 75 |
| Figura 65 <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra M1</i> | 76 |
| Figura 66 <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra M2</i> | 77 |
| Figura 67 <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra M3</i> | 77 |
| Figura 68 <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestras M1, M2 y M3</i> | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 69 <i>Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia M1, M2 y M3 a los 7 días.</i> | 78 |
| Figura 70 <i>Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia M1, M2 y M3 a los 14 días.</i> | 79 |
| Figura 71 <i>Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia M1, M2 y M3 a los 28 días.</i> | 79 |
| Figura 72 <i>Curva granulométrica del agregado grueso.</i> | 81 |
| Figura 73 <i>Moldes llenos de agregado grueso.</i> | 82 |
| Figura 74 <i>Moldes llenos de lechada cementicia.</i> | 82 |
| Figura 75 <i>Moldes llenos de agregado grueso y lechada cementicia.</i> | 83 |
| Figura 76 <i>Muestras de cilindros desmoldados.</i> | 83 |
| Figura 77 <i>Medición de cilindro piedra-cemento.</i> | 84 |
| Figura 78 <i>Cilindro del material piedra-cemento antes de la rotura.</i> | 85 |
| Figura 79 <i>Cilindro del material piedra-cemento después de la rotura.</i> | 85 |
| Figura 80 <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra-cemento.</i> | 86 |
| Figura 81 <i>Excavación y colocación de armado estructural.</i> | 87 |
| Figura 82 <i>Posicionamiento de camisa de plástico (tubería corrugada de 400 mm).</i> | 88 |
| Figura 83 <i>Colocación de geotextil y tubería de inyección-reinyección.</i> | 88 |
| Figura 84 <i>Vaciado de material grueso en el armado del pilote.</i> | 89 |
| Figura 85 Inyección del pilote con lechada cementicia. | 89 |
| Figura 86 <i>Pilote después de la inyección cementicia.</i> | 90 |
| Figura 87 <i>Reinyección de pilote inyectado.</i> | 90 |
| Figura 88 <i>Retiro de camisa de plástico.</i> | 91 |
| Figura 89 <i>Pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de gravas excavadas.</i> | 91 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Propiedades de los geotextiles | 32 |
| Tabla 2 Métodos de inyección de lechada | 46 |
| Tabla 3 Tipo de inyección de lechada a utilizar según tipo de suelo | 48 |
| Tabla 4 Métodos de ultrasonidos | 57 |
| Tabla 5 <i>Diseño de lechada cementicia</i> | 69 |
| Tabla 6 <i>Diseño de lechada cementicia por metro cúbico</i> | 69 |
| Tabla 7 <i>Peso y medición de cilindros de lechada, muestras M1, M2 y M3 a los 7 días</i> | 73 |
| Tabla 8 <i>Peso y medición de cilindros de lechada, muestras M1, M2 y M3 a los 14 días</i> | 74 |
| Tabla 9 <i>Peso y medición de cilindros de lechada, muestras M1, M2 y M3 a los 28 días</i> | 74 |
| Tabla 10 <i>Evolución de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia (M1, M2 y M3)</i> | 76 |
| Tabla 11 <i>Granulometría de material grueso para moldes</i> | 80 |
| Tabla 12 <i>Descripción y características del material grueso para moldes</i> | 81 |
| Tabla 13 <i>Dimensiones de cilindros del material piedra-cemento</i> | 84 |
| Tabla 14 <i>Evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra-cemento</i> | 86 |

Resumen

Este presente trabajo de titulación tiene como objetivo realizar una investigación bibliográfica sobre el uso, los principios teóricos y la aplicación de los pilotes inyectados y reinyectados. Asimismo, se propone un nuevo elemento estructural enfocado en las cimentaciones profundas para los suelos blandos en la ciudad de Guayaquil, y se presenta una metodología constructiva viablemente económica para este elemento estructural. El elemento propuesto es el pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de grava excavadas, que es una combinación del enfoque mencionado, donde se aprovechan materiales y métodos de construcción que resultan más rápidos y económicos. El diseño de la lechada cementicia y la granulometría óptima realizada en laboratorio permitiría que la primera alcanzara una resistencia para trabajar el pilote de manera eficiente por la inyección y la reinyección en la punta no solo por fuste, sino también por punta, debido al sistema radicular obtenido en la punta por la reinyección.

Palabras clave: pilotes inyectados, pilotes reinyectados, geotextil, cimentaciones profundas, pilotes estructurales, suelos blandos.

ABSTRACT

This thesis aims to conduct a bibliographical research on the use, theoretical principles and application of injected and reinjected piles. Likewise, a new structural element, focused on deep foundations for soft soils in the city of Guayaquil, is proposed, as well as a viable economic construction methodology for this structural element is presented. The proposed element is the injected and reinjected pile from excavated gravel columns, which is a combination of the aforementioned approach, where faster and cheaper materials and construction methods are used. The design of the cementitious grout and the optimal granulometry carried out in the laboratory would allow the former to achieve a resistance to work the pile efficiently by injection and reinjection at the tip not only by shaft, but also by tip, due to the root system obtained at the tip by reinjection.

Keywords: injected piles, reinjected piles, geotextile, deep foundations, structural piles, soft soils.

Introducción

Antecedentes

La ciudad de Guayaquil tiene una característica peculiar en sus suelos: estos se conforman por elementos deltaicos estuarinos y aluviales, y la Norma Ecuatoriana de la Construcción los clasifica como tipo F. Cabe señalar que la formación de estos depósitos se debe al río Guayas, que tiene otros dos ríos como principales afluentes: el Daule y el Babahoyo.

Ahora bien, en la zona deltaica estuarina de Guayaquil se identifican perfiles geológicos caracterizados por depósitos significativos de suelos arcillosos con una consistencia que varía entre muy blanda y firme en los primeros 20 a 30 m de profundidad. Estos depósitos están superpuestos a capas de mezclas limo-arcillosas de 5 a 10 m de espesor, que incluyen intercalaciones de arena de densidad media (Paredes, 2020).

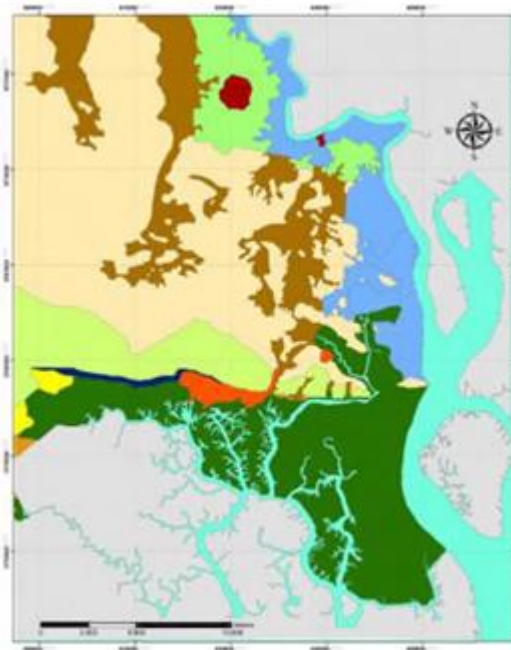


Figura 1 Mapa estratigráfico de la ciudad de Guayaquil.

Nota. Tomado de *Mejoramiento masivo de subsuelos mediante pilas de agregado apisonado (RAP) en suelos tipo F según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015*, por J. Bravo, 2016, <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5372>

En otro sector de la ciudad, existen estratos de suelos arcillosos a profundidades mayores a 30 m, influenciados por esteros. En estas áreas se pueden observar problemas estáticos y dinámicos en la respuesta del suelo bajo diferentes niveles de demanda. Estudios previos han determinado que el espesor del material sedimentario en esta región oscila entre los 50 y 120 m, debajo de donde se encuentran materiales más competentes, comparables a las rocas (Paredes, 2020).

Una solución a la que se acudía en anteriores épocas en el viejo Guayaquil para construir viviendas sobre suelos blandos era la del uso de pilotes de hormigón en la ciudad, esto es, los pilotes de mangle. De hecho, en la actualidad existen casas o edificios que tienen cimentaciones con pilotes de mangle. Pero, una vez que hubo un uso excesivo del mangle, se evidenció su escasez, lo que posteriormente incidió en la prohibición de su tala y su uso.

Por otro lado, durante la presidencia de Jamil Mahuad, se emitieron por decreto “disposiciones relativas a la protección, conservación y manejo del recurso manglar”, lo que incluía tres artículos en el Decreto 1102, que se derogó por el Decreto 3399 de 2002, el cual se implementó en el Acuerdo 198 para la creación del *Manual operativo para el incentivo a la conservación y uso sustentable del manglar* en el 2014.

Al respecto, se debe mencionar que la construcción de edificaciones tiene un costo elevado, debido a los suelos blandos; es decir, las cimentaciones profundas inflan el presupuesto de una edificación, pues no se sabe exactamente a qué profundidad se encuentra el estrato resistente de la zona en la que se va a construir. Esto conlleva el uso de pilotes hincados o barrenados, y ambos se pueden trabajar por punta o fuste. En ese sentido, estos tienen un costo elevado que encarece la construcción.

Justificación

La problemática tratada en los antecedentes de esta tesis ha resultado en una baja incidencia de construcciones sobre este tipo de suelos en Guayaquil. Además, las construcciones que se llevan a cabo presentan costos significativamente más altos en comparación con proyectos similares en otras regiones del país. De esa forma, esta investigación busca proponer una solución a la urgente necesidad de adoptar un nuevo método constructivo alternativo que asegure la estabilidad de las estructuras, reduzca el costo y minimice el impacto ambiental. Lograr estos objetivos podría contribuir,

además, al fomento y la expansión de las actividades constructivas en estas áreas, lo que favorecería un desarrollo poblacional más sostenible en la ciudad.

Objetivo general

Establecer los criterios para el proceso de instalación de pilotes inyectados a partir de columnas de grava en las arcillas de Guayaquil, con una posterior reinyección de lechada de cemento en la punta para incrementar la capacidad de soporte y disminuir la subpresión inicial. Asimismo, se propone un nuevo elemento constructivo, más económico y sustentable, que pueda incorporarse a la estructura de las edificaciones.

Objetivos específicos

- Definir con ensayos de laboratorio: a) la granulometría ideal para las columnas de grava que posteriormente se inyectarían con lechada de cemento; b) diseñar una lechada de inyección de cemento apropiada para estos pilotes construidos a partir de columnas de grava; c) establecer la resistencia a la compresión simple en roturas de probetas para este material previamente inyectado en tales especímenes; y d) realizar un video de la fundición en laboratorio de un tramo de pilote de grava inyectado con lechada de cemento para, posteriormente, realizar una revisión forense de la calidad de la fundición de este elemento.
- Sistematizar esquemáticamente, en una propuesta innovativa y gráfica, el proceso constructivo para la ejecución de los siguientes: a) la apertura del hueco por desplazamiento en arcillas de Guayaquil; b) la instalación del geotextil y el llenado de la columna de grava; c) el proceso de inyección y reinyección con lechada de cemento en una columna de grava; y d) el arreglo general de las columnas de piedra para su incorporación al sistema estructural de una edificación.

Capítulo I. Marco teórico

1.1 Marco geológico de Guayaquil

1.1.1 Suelos aluviales

Estos suelos son depósitos sedimentarios ubicados en planicies costeras y valles interiores. Se caracterizan por estratos de textura variable y son de reciente formación, sin modificaciones significativas por agentes externos como agua o clima. Se encuentran típicamente en áreas con pendientes suaves o casi planas, donde el nivel freático es cercano a la superficie y el drenaje suele ser deficiente. Estos suelos son altamente productivos, lo que favorece la agricultura intensiva y mecanizada, adecuada para una amplia gama de cultivos, y la cual brinda la posibilidad de implementar sistemas de riego.

De ese modo, la llanura aluvial se ubica al noreste de Guayaquil, en las zonas pertenecientes a los municipios de Samborondón y Durán. Esta región se constituye por dos afluentes, los ríos Daule y Babahoyo, los cuales confluyen en la zona conocida como La Puntilla, cercana al puente de la Unidad Nacional. Asimismo, tal confluencia da origen al río Guayas, que fluye hacia el sur, entre las colinas Durán y Santa Ana-El Carmen.

1.1.2 Complejo deltaico estuarino

Es una extensión geográfica considerable, con una configuración aproximadamente triangular, compuesta por numerosas islas cubiertas de manglares y canales de agua salobre. Se extiende desde los cerros de El Carmen, Santa Ana y Durán hacia el sur, hasta su extremo meridional, donde se separa de la isla Puná por un canal que conecta otros dos canales, Jambelí y El Morro, frente a Posorja.

Por otra parte, según Geoestudios S. A. (2015), los elementos geomorfológicos principales incluyen un canal distributivo principal que se forma por el estuario Guayas, así como por el malecón natural y los canales, junto con las islas del Estero Salado.

1.1.3 Cordillera Chongón Colonche

Esta cadena montañosa se encuentra en el cuadrante noroeste de la ciudad y se extiende hacia el oeste, desde los cerros del barrio San Pedro y la ciudadela Bellavista. Es una estructura homoclinal con una dirección donde predomina un promedio de N110, que eleva rocas antiguas del Paleoceno y el Cretácico, las cuales se han visto inmersas en intensos procesos erosivos desde aproximadamente el Eoceno Superior, hace unos 40 millones de años. Además, dentro de esta región macrogeológica se encuentran las formaciones Ancón, Las Masas, San Eduardo, Guayaquil, Cayo y Piñón. De acuerdo con Geoestudios S. A. (2015), las geoformas del sector mencionado se definen en tres dominios de relieve:

- Dominio estructural.
- Dominio erosivo.
- Dominio acumulativo.

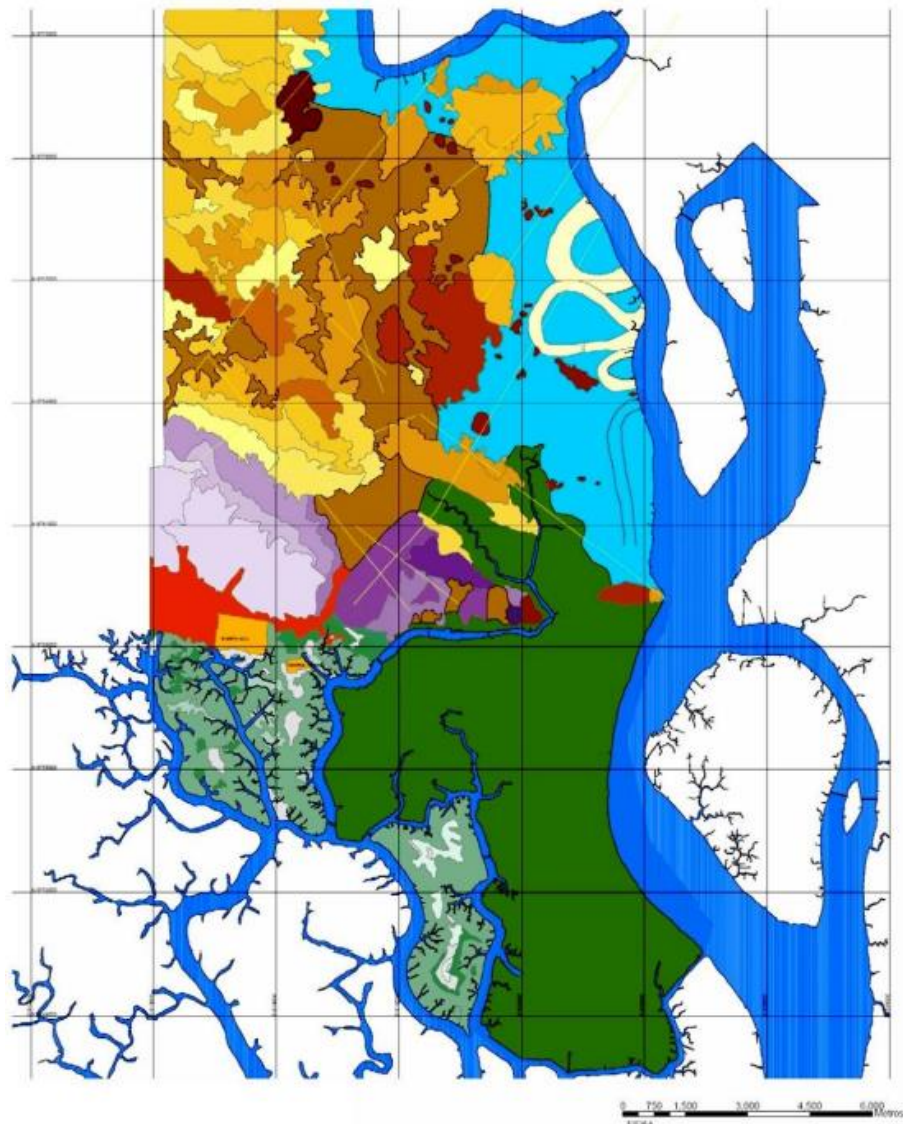


Figura 2 Mapa geomorfológico de Guayaquil.

Nota. Tomado de *Manual práctico para la caracterización geológica, geotécnica y sísmica de la ciudad de Guayaquil*, por Geoestudios S. A., 2015, <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/sgr-presenta-manual-practico-para-la-caracterizacion-geologica-y-sismica-de-guayaquil/>

1.1.3.1 Dominio estructural

Corresponde a la parte meridional de la cordillera Chongón Colonche. Se trata de una pendiente homoclinal conformada por las calizas de la formación San Eduardo y las lutitas silíceo calcáreas de la formación Guayaquil. El relieve se determina por la estructura geológica homoclinal, que presenta un ángulo de inclinación promedio de 17° , el cual varía entre 15° y 40° , hacia el sur. Igualmente, las unidades

geomorfológicas incluyen colinas altas (de 200 a 400 m sobre el nivel del mar [msnm]) y colinas medias (de 100 a 200 msnm) con crestas afiladas. Es relevante mencionar que el término *cordillera* típicamente se reserva para cerros que superan los 400 m de altura; no obstante, este se utiliza a pesar de que las pendientes naturales en esta región suelen ser menores a 40°.

1.1.3.2 Dominio erosivo

Se refiere a la porción septentrional de la cordillera Chongón Colonche, donde se exponen las rocas de la formación Piñón y Cayo. En esta zona, la topografía puede mostrar pendientes que divergen de la dirección general de la estructura homoclinal predominante en el área.

De otra parte, las principales formas del relieve consisten en colinas de baja elevación, con altitudes inferiores a 100 msnm, y superficies con pendientes moderadas que no superan los 30°. Estas colinas tienen una forma alargada orientada de oeste-noroeste a este-sureste, lo cual muestra la influencia estructural ejercida por la homoclinal con la misma orientación.

1.1.3.3 Dominio acumulativo

Se denomina como un área de acumulación dentro del amplio dominio de la cordillera Chongón Colonche, sobre todo cuando esta región se erosiona constantemente, y cuando se forman temporalmente depósitos de materiales provenientes de este proceso. Dichos depósitos suelen incluir conos de deyección, acumulaciones coluviales y aluviales, así como depósitos lacustres.

1.1.4 Tipos de suelos

La combinación de diferentes ambientes geológicos, la presencia de diversos materiales originales *in situ* y la influencia de procesos geodinámicos externos da lugar a la variedad de suelos que existen en Guayaquil.

1.1.4.1 Suelo residual

Se observa una clara influencia del tipo de roca y la formación geológica. Los suelos que surgen sobre las rocas de la formación Guayaquil suelen tener un color rojo ladrillo y tienen un espesor que varía entre 1 y 3 m. Estos son particularmente espesos en los

cerros de Durán y en la parte occidental de Guayaquil (en el sector de la Avenida del Bombero), donde se pueden encontrar perfiles de roca meteorizada con espesores de hasta 30 m.

De igual manera, los suelos que se desarrollan sobre las areniscas y brechas de la formación Cayo suelen ser menos gruesos en comparación con los de la formación Guayaquil. Se observan típicamente capas de suelo arcilloso orgánico negro con espesores que van desde 20 cm hasta 1 m. Por debajo de esta capa, generalmente se encuentra una capa métrica de arcilla limo-arenosa de color café rojizo. Además, las rocas meteorizadas pueden encontrarse posteriormente y alcanzar espesores de 10 a 15 m.

Por otro lado, los suelos que se observan en las lutitas de la formación Cayo muestran también tonalidades rojas o amarillo rojizas y son más gruesos que los desarrollados en las areniscas. Un ejemplo destacado se tiene en el área del cerro Jordán y sus alrededores, donde se han formado suelos de color rojo ladrillo de considerable espesor. Esta área coincide con una zona de falla de orientación de norte-este a suroeste, cuya presencia probablemente ha favorecido el desarrollo extensivo de estos suelos, además del control litológico mencionado.

Finalmente, los suelos que se establecen sobre las rocas de la formación Piñón, principalmente las diabasas, son arcillosos y de tonalidad café. En los casos donde las rocas de Piñón son brechas volcánicas, como en el relleno sanitario de Las Iguanas, los suelos son muy profundos y contienen arcillas verdosas de tipo clorítica y bentonítica.

1.1.4.2 Suelo transportado

La erosión produce material que se deposita en las bases de las colinas o en los cauces y valles en desarrollo, con lo que se forman los suelos transportados, los cuales se desarrollan a cierta distancia de la roca original. Un ejemplo de este tipo de suelos se encuentra en Mapasingue y la Avenida Las Aguas, donde se han visto suelos compuestos por material grueso, como la arenisca de grano grueso, fácilmente erosionable, la cual se mezcla con lutitas para rellenar el área.

1.1.4.3 Suelos coluviales

Estos se localizan en la parte más baja de las colinas altas, previamente clasificadas como dominio estructural. En laderas meridionales, como en la Cooperativa San Pedro, se pueden observar coluviales que alcanzan varios metros de espesor. Estas arcillas son típicamente rojas, duras al tacto cuando están secas, pero muy plásticas en condiciones húmedas, y contienen cantidades variables de bloques de lutitas silíceas. Además, en las laderas meridionales de estas colinas se encuentran varios abanicos aluviales.

1.1.4.4 Suelos coluviales aluviales

Se encuentran en los cauces o al pie de las colinas dentro del dominio erosivo, como en las de Los Ceibos o en el campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Adicionalmente, son suelos de grano heterogéneo que incluyen desde arcillas y limos hasta arenas y fragmentos de conglomerado anguloso, alternan con capas arcillosas negras expansivas de origen lacustre, y pueden alcanzar varios metros de espesor.

1.1.4.5 Suelos aluviales

Se encuentran en la cuenca de drenaje del río Guayas, y se transportan y depositan a lo largo de la extensa y plana plataforma que forman los ríos Daule y Babahoyo. Estos suelos se definen claramente en los límites al noreste del área, como en la ciudadela Saucos VI, donde se empieza a notar la influencia del macrodominio de la llanura aluvial de los ríos Daule y Babahoyo.

1.1.4.6 Suelos deltaicos estuarinos

Aunque el área total de la ciudad comparte un ambiente geomorfológico similar, se han identificado diferencias significativas en los sedimentos de los suelos. Estas variaciones probablemente se deben a que las partículas suspendidas se expusieron a diferentes regímenes de agua, como la marina, la salobre y la dulce, lo que modificó las propiedades geotécnicas de los suelos depositados. De ese modo, los suelos estuarinos se componen principalmente de arcilla limosa de color gris verdoso con

capas de arena limosa y, con menor frecuencia, de bancos de arena con detritos de conchas.

1.1.5 Tipos de formaciones geológicas

1.1.5.1 Formación Piñón

Este es el basamento cristalino de la costa ecuatoriana, conformado por un complejo volcánico compuesto principalmente de rocas basálticas con lavas almohadilladas, lo que sugiere que estas se depositaron en un entorno acuático (Geoestudios S. A., 2015). Por otra parte, Geoestudios S. A. (2015) explicó que la formación Piñón también exhibe lavas con formas de enfriamiento columnar o masivo, y que hay una presencia significativa de intrusiones de composición que varía desde la granodiorítica hasta la tonalítica.

1.1.5.2 Formación Cayo

La formación Cayo consiste en un conjunto significativo de rocas de origen volcánico clástico depositadas en un ambiente marino. Esta formación se encuentra sobre la formación Piñón y debajo de la formación Guayaquil, que están en contacto erosional con la formación Piñón (Geoestudios S. A., 2015).

1.2 Marco sísmico

1.2.1 Bordes convergentes o subducción de placas

La subducción se origina debido a una colisión entre dos placas con movimientos en sentidos diferentes. La placa más densa se hunde debajo de la menos densa a lo largo de una zona conocida como zona de subducción, y la placa que subduce se adentra en el manto, donde se calienta y se funde parcialmente, con lo que se genera el magma que asciende a la superficie. Al respecto, se debe señalar que una zona de subducción se caracteriza por características como la deformación, el vulcanismo, la formación de montañas, el metamorfismo, la actividad sísmica y los depósitos minerales significativos.

1.2.1.1 Placas convergentes oceánicas

En la colisión de dos placas oceánicas, una de ellas, la que tiene el borde más denso, se desliza bajo la otra. A este proceso se le conoce como subducción, y provoca deformaciones en el borde no subducido y la depresión que se denomina fosa o trinchera oceánica. El magma que genera la placa se introduce y alcanza el manto, con lo que se producen volcanes en la placa superior, los cuales pueden crecer por encima del nivel del mar para formar arcos de islas o un arco insular volcánico.



Monte Fuji, Japón Islas Palau, Filipinas

Figura 3 *Placas convergentes oceánicas.*

Nota. Tomado de *Tectónica de placas*, por Servicio Geológico Mexicano, 2017, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html#>

1.2.1.2 Placas convergentes oceánico-continentales

La corteza oceánica, que es más densa, se introduce por debajo de la corteza continental, que es más ligera, y flota sobre ella. A su vez, la corteza oceánica retorna al manto, donde las altas temperaturas la funden. Cabe resaltar que las placas no se deslizan suave y continuamente una sobre otra; en cambio, debido a las fuerzas de compresión, hay una gran fricción entre ellas, lo que las une temporalmente. Es así como el movimiento relativo de ambas placas provoca deformaciones, algunas permanentes, lo que contribuye a la creación de cadenas de volcanes que se conocen como montañas de arco o arcos volcánicos.



Figura 4 Placas convergentes oceánico-continuales.

Nota. Tomado de *Tectónica de placas*, por Servicio Geológico Mexicano, 2017, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html#>

1.2.1.3 Placas convergentes continental-continental

Durante una colisión entre continentes, los resultados difieren de los casos anteriores. Dado que ambos continentes son demasiado livianos para hundirse en el manto mediante el proceso de subducción, el movimiento se absorbe a través de la deformación vertical de ambas placas. Estas quedan unidas por una zona de sutura, lo que origina la formación de un cinturón montañoso interior y provoca numerosos sismos. Este proceso es fundamental, puesto que ha dado lugar a las cadenas montañosas más altas de la Tierra y continúa siendo un fenómeno activo en la actualidad.

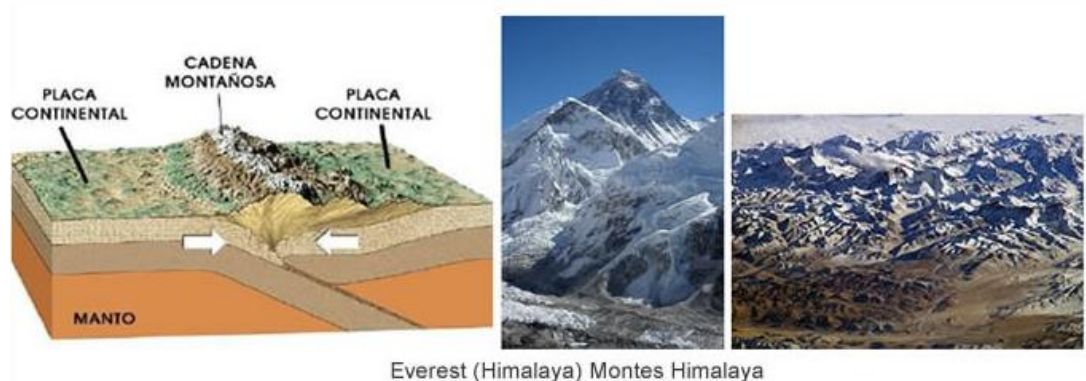


Figura 5 Placas convergentes continental-continental.

Nota. Tomado de *Tectónica de placas*, por Servicio Geológico Mexicano, 2017, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html#>

1.2.2 Plataforma continental e insular del Ecuador

Desde el punto de vista de la tectónica de placas, el territorio ecuatoriano presenta una configuración única que incluye los siguientes elementos:

- El punto caliente de las Galápagos.
- El centro de divergencia que divide las placas de Cocos y Nazca.
- La zona de subducción, que es donde la placa oceánica de Nazca se subduce bajo el margen continental. Esta se compone por la placa Sudamericana y el Bloque Norandino.

1.2.2.1 Punto caliente de las Galápagos

Un punto caliente se refiere a una región en el manto terrestre donde el material caliente asciende hacia la superficie, lo que genera un vulcanismo anómalo en comparación con las zonas de límite de placas tectónicas. Estos puntos calientes son responsables de la formación de islas volcánicas y otras estructuras geológicas significativas. De ese modo, a diferencia del vulcanismo asociado con los límites de placas, que ocurre debido a la interacción directa entre ellas, los puntos calientes se forman en el interior de las placas tectónicas y se mantienen relativamente fijos mientras las placas se mueven sobre ellos.

Según Martillo et al. (2020), el punto caliente de las Galápagos ha generado una serie de elevaciones morfobatimétricas en el fondo oceánico que se extienden hacia los márgenes costeros del Pacífico Oriental, como los altos de Carnegie, Cocos, Colón y Malpelo. En consecuencia, la formación de estas estructuras se ve principalmente influenciada por la posición relativa entre la dorsal y el punto caliente, así como por los vectores de convergencia de las placas oceánicas. Muchas de estas elevaciones se subducen a lo largo de la fosa de Ecuador y Colombia, al igual que la fosa Centroamericana.

Por otro lado, la región insular es donde se ubican las Islas Galápagos, que se sitúan por encima de la placa Nazca, aproximadamente a 250 km del sur de la dorsal de Galápagos. Estas islas, que abarcan menos de 45 000 km², constituyen una de las zonas volcánicas más activas del planeta. Tal actividad se debe al ascenso de material magmático y su dispersión en la provincia ígnea de Galápagos, compuesta principalmente de basalto. Esta región se conoce como la plataforma de las islas

Galápagos y se extiende hacia el oeste, con lo que se alcanza una longitud de 1000 km. A esta se le conoce como la cordillera Carnegie.

La actividad volcánica en la provincia de Galápagos aumenta en edad hacia el este, conforme la placa de Nazca se aproxima al margen continental de Ecuador. Además, las islas occidentales, que coinciden con el punto caliente de Galápagos, presentan grandes volcanes tipo escudo con calderas profundas. En contraste, los volcanes situados más al este poseen pendientes suaves y menor elevación.

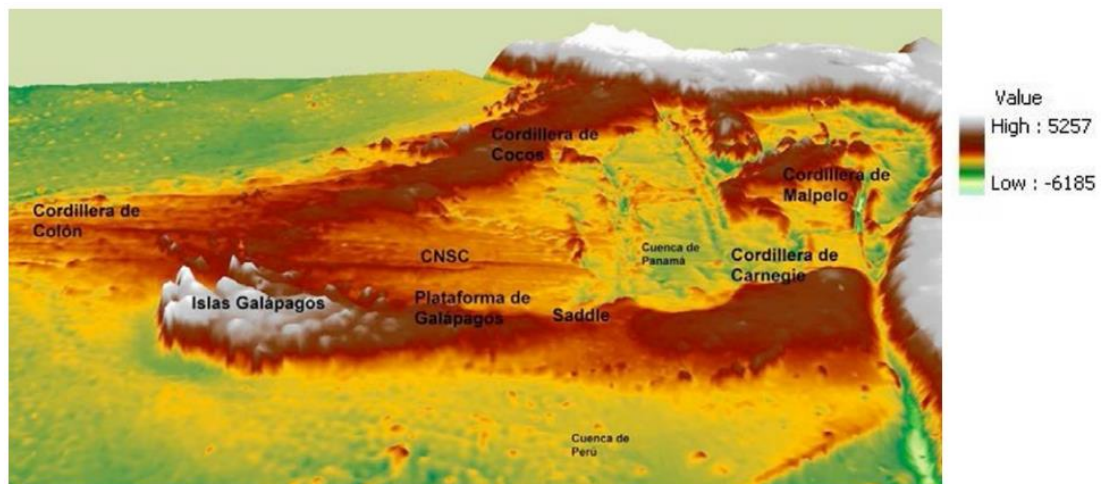


Figura 6 Modelado digital del terreno marítimo de la continuidad morfológica entre las Islas Galápagos y la cordillera de Carnegie.

Nota. Tomado de “Descripción morfológica de la plataforma continental del Ecuador y análisis comparativo con la plataforma jurídica aplicando la CONVEMAR, mediante el uso de sistemas de información geográfica”, por C. Martillo et al., 2020, *Revista Acta Oceanográfica del Pacífico*, 2(2).

1.2.2.2 Cordillera de Carnegie

A lo largo de la costa de Ecuador, se pueden observar fragmentos variados de microplacas o depósitos acumulados que son vestigios de las antiguas islas superiores de las Islas Galápagos. Estos restos forman parte de una cadena submarina de volcanes extintos conocida como la cordillera o la cresta de Carnegie (Gallardo y Toulkeridis, 2008).

Por su parte, Collot et al. (2009) indicaron que la cordillera de Carnegie se extiende desde las Islas Galápagos hasta la fosa de subducción sudamericana a la latitud del Ecuador, en una región de alta productividad ecuatorial. Esta cordillera se forma por

dos ramales separados por un bajo topográfico que alcanza una profundidad de 2300 m. El ramal occidental sostiene las Islas Galápagos, mientras que el ramal oriental culmina a menos de 700 m de profundidad cerca de la fosa de subducción. Finalmente, el flanco sur del ramal oriental se ve bordeado por una serie de montes submarinos de cima plana.

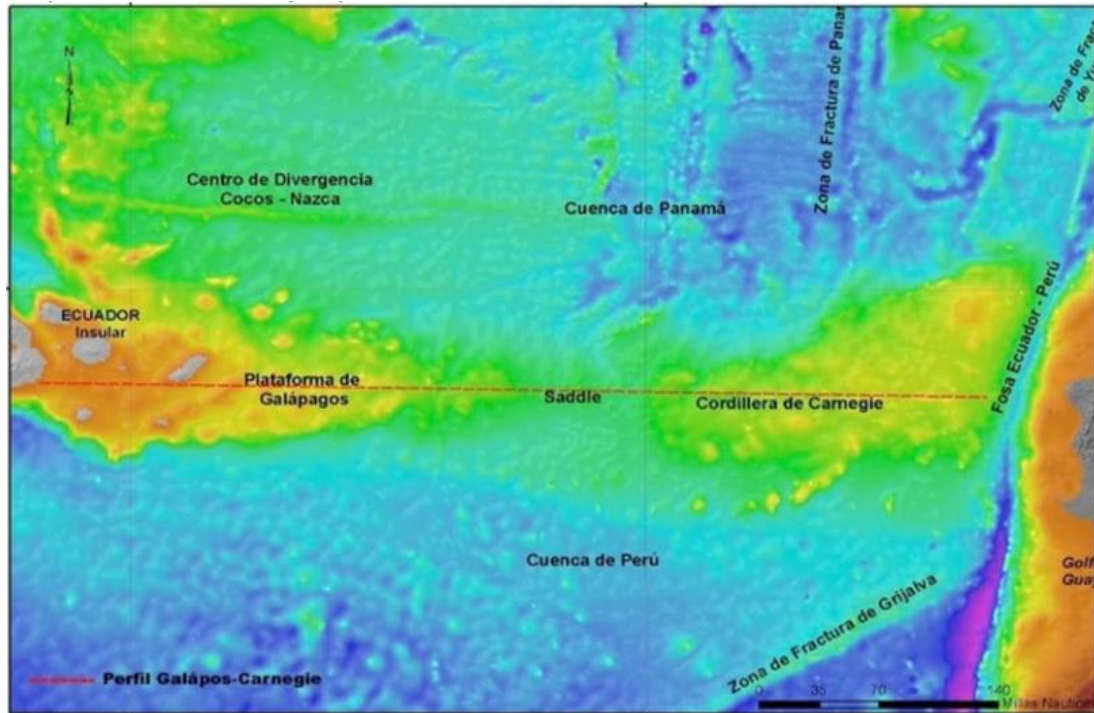


Figura 7 Perfil batimétrico entre Galápagos-Carnegie.

Nota. Tomado de “Descripción morfológica de la plataforma continental del Ecuador y análisis comparativo con la plataforma jurídica aplicando la CONVEMAR, mediante el uso de sistemas de información geográfica”, por C. Martillo et al., 2020, *Revista Acta Oceanográfica del Pacífico*, 2(2).

1.2.2.3 Zona de subducción entre las placas Nazca y Sudamericana

Existe una zona de convergencia en el margen ecuatoriano caracterizada por la subducción de la placa de Nazca debajo del bloque Norandino. Durante dicha subducción, la placa de Nazca transporta la cordillera asísmica de Carnegie, un alto batimétrico que influye significativamente en la geodinámica de la región.

Según Collot et al. (2009), la placa de Nazca converge hacia la placa Sudamericana a una velocidad de 58 mm/año con una dirección este-oeste. La cordillera asísmica de Carnegie, situada sobre esta placa, se eleva 2 km por encima de la base de la placa de

Nazca y tiene un ancho de 280 km en la zona de la fosa. Esta cordillera submarina subduce frente al margen central de Ecuador con un ángulo de entre 4° y 9° en los primeros kilómetros. Además, en zonas más distales con respecto a la fosa, y debido a su baja densidad, presenta un ángulo de subducción bajo de 25° , que es menor en comparación con la placa oceánica ubicada al norte de esta cordillera submarina, la cual tiene un ángulo de subducción de 30° a 35° .

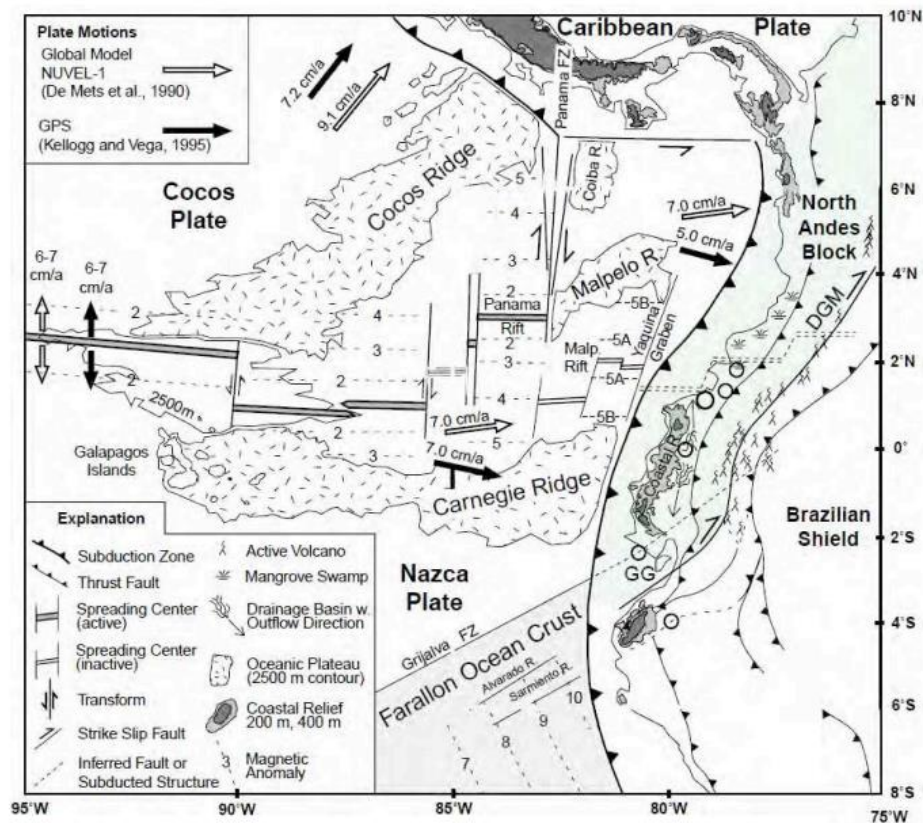


Figura 8 Interacción entre las placas Nazca y Cocos con la placa Sudamericana.

Nota. Tomado de *Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador*, por J. Collot et al., 2009, Comisión Nacional del Derecho del Mar (CNDM).

1.2.3 Formación del golfo de Guayaquil

El proceso de formación del golfo de Guayaquil tuvo lugar en algún momento del Mioceno Medio, cuando la colisión de la cordillera Carnegie provocó el desplazamiento hacia el noreste de los terrenos alóctonos que constituyen el basamento de la costa ecuatoriana. Este proceso generó un movimiento transcurrente dextral regional y una extensión en el sur (Cobos y Montenegro, 2010).

El golfo de Guayaquil se distingue por la acumulación de más de 4 km de sedimentos cuaternarios y una serie de fallas generadas por su apertura, la cual se atribuye al desplazamiento a lo largo de la megafalla Guayaquil-Dolores (megacizalla). Al respecto, Collot et al. (2009) señalaron que en la plataforma continental se han ido acumulando sedimentos terrígenos debido a la afluencia de los ríos, con lo que se han creado cuencas potenciales de altos hidrocarburos.



Figura 9 Ubicación geográfica del golfo de Guayaquil.

Nota. Tomado de *Estudio integrado del golfo de Guayaquil del Mioceno al reciente*, por L. E. Cobos y G. Montenegro, 2010, ESPOL - Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT).

1.2.4 Megafalla Guayaquil-Dolores

Ecuador, ubicado en una zona tectónicamente activa, presenta una compleja red de fallas geológicas debido a la interacción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Esta convergencia ha dado lugar a una diversidad de estructuras tectónicas que incluyen fallas de desplazamiento, fallas normales y fallas inversas, cada una con características y efectos geodinámicos particulares.

La megafalla Guayaquil-Dolores se extiende desde el golfo de Guayaquil y recorre la cordillera Occidental de los Andes en Ecuador y Colombia hasta llegar al Caribe. Esta megafalla representa un desprendimiento del bloque Norandino, el cual se desplaza

hacia el norte con un movimiento dextral a una velocidad de 0.6-1 cm/año, y ha sido responsable de la apertura del golfo de Guayaquil desde hace aproximadamente dos millones de años. En ese sentido, el desplazamiento del bloque Norandino en dirección noreste provoca el movimiento hacia el sur de la cordillera Carnegie (Collot et al., 2009).

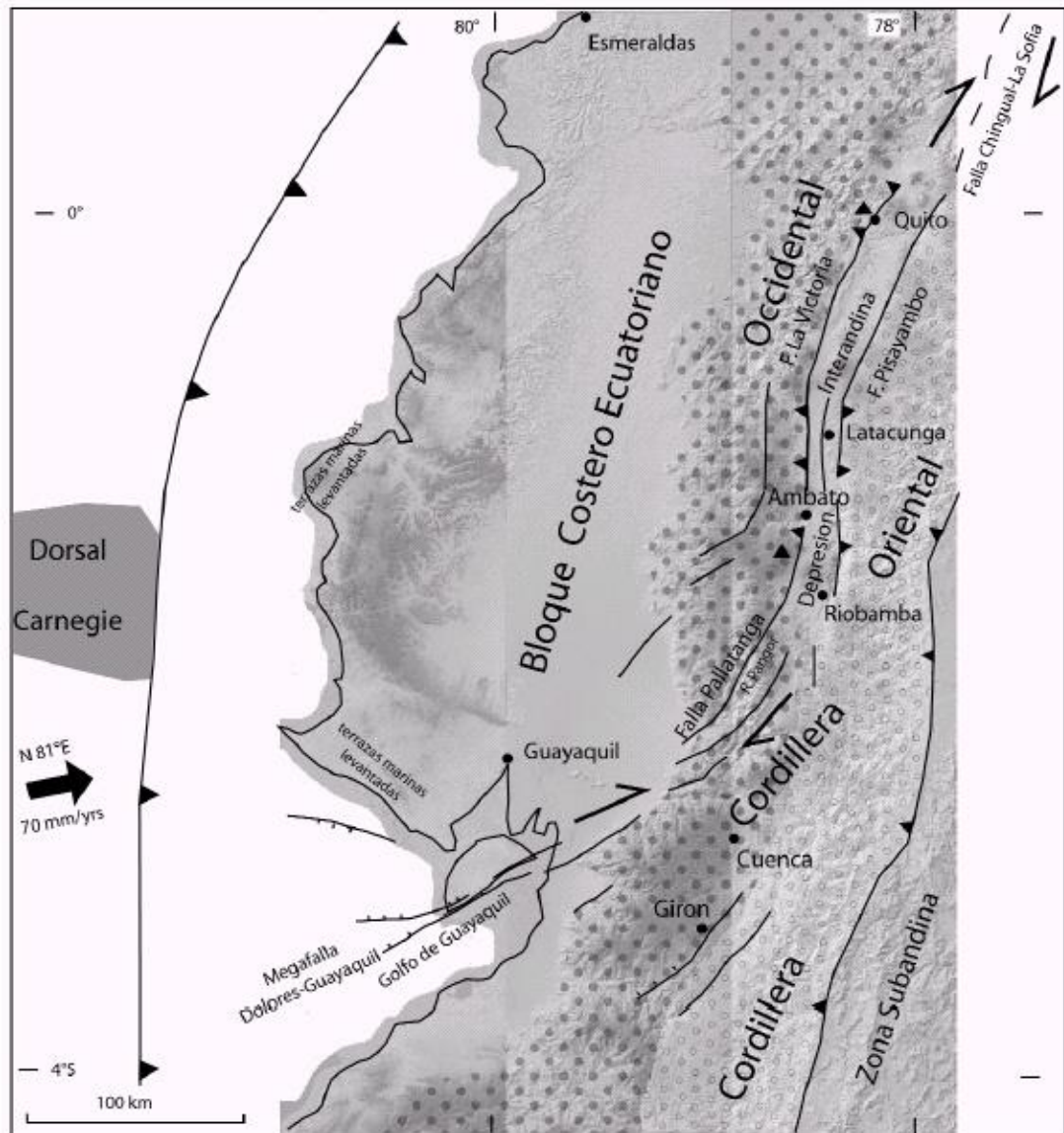


Figura 10 Inicio de megafalla Guayaquil-Dolores.

Nota. Tomado de “Neotectónica de los Andes entre 1° N y 47° S (Ecuador, Bolivia y Chile): una revisión”, por A. Lavenu, 2006, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4).

1.3 Tipos de cimentaciones

La cimentación de una estructura es un componente crucial para el diseño y la construcción de edificaciones e infraestructuras. Su función principal es transferir las cargas de la superestructura al suelo de manera segura y eficiente, con lo que se garantizan la estabilidad y la durabilidad del conjunto estructural. Este proceso involucra un análisis detallado de las propiedades del suelo, las cargas que se deben imponer y los requisitos específicos de la estructura.

Asimismo, el diseño de cimentaciones implica una serie de consideraciones geotécnicas y estructurales. Desde el punto de vista geotécnico, es fundamental realizar estudios de suelos que incluyan ensayos de campo y laboratorio para determinar parámetros clave, como la capacidad portante, la consolidación y el comportamiento bajo cargas cíclicas. Estos estudios permiten predecir y mitigar posibles problemas, como los asentamientos diferenciales, licuación o deslizamientos de tierra.

En ese orden de ideas, se debe garantizar que las cimentaciones puedan resistir tanto las cargas estáticas como las dinámicas, donde se incluyen las provocadas por sismos. Además, se deben considerar aspectos de durabilidad, como la protección contra la corrosión en ambientes agresivos y la resistencia al ataque de sulfatos en suelos y aguas subterráneas. De acuerdo con Yepes (2020), las cimentaciones se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Cimentación superficial o directa:
 $D/B < 4$.
 $D < 3 \text{ m}$.
- Cimentación semiprofunda o de pozos:
 $4 \leq D/B \leq 8$.
 $3 \text{ m} \leq D \leq 6 \text{ m}$.
- Cimentación profunda o de pilotaje:
 $D/B > 8$.
 $D > 6 \text{ m}$.

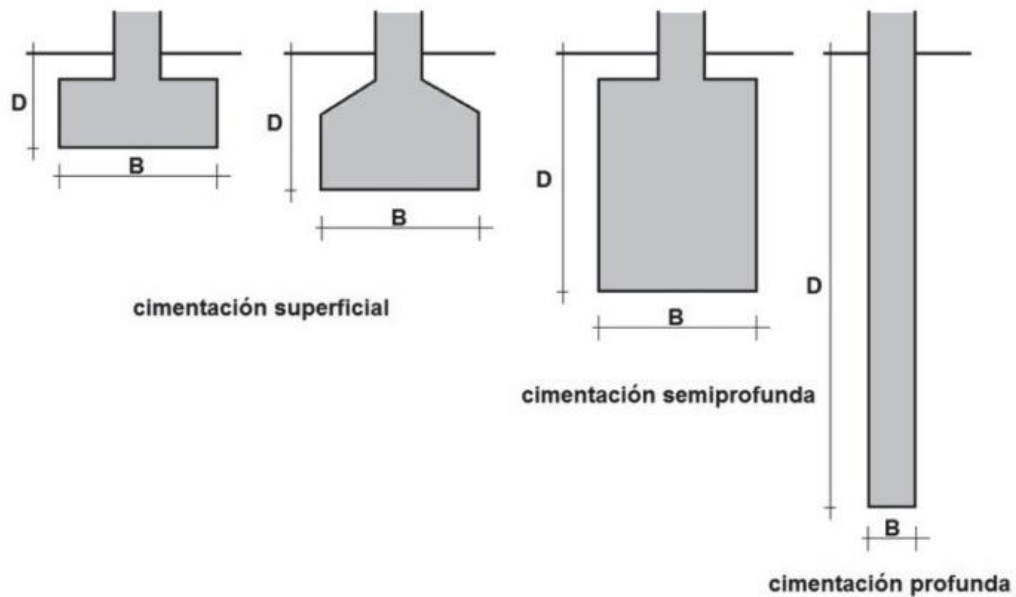


Figura 11 Tipos de cimentaciones con relación a la profundidad.

Nota. Tomado de *Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención*, por V. Yepes, 2020, Editorial Universitat Politècnica de València.

1.3.1 Cimentaciones profundas

Las cimentaciones profundas son estructuras que se utilizan en la ingeniería de cimentaciones para transferir cargas de edificaciones y otras estructuras al suelo o la roca a profundidades significativas. Braja (2012) explicó que, durante los procesos de construcción, y al momento de seleccionar un tipo de pilotes, se revisan las características del tipo de carga a soportar, así como la ubicación del nivel freático y de las condiciones de suelo. Estos pilotes se categorizan así:

- Pilotes de acero.
- Pilotes de concreto.
- Pilotes de madera.
- Pilotes compuestos.

Los pilotes de concreto, tanto precolados como colocados *in situ*, juegan un papel crucial en la ingeniería de cimentaciones profundas, debido a sus diferentes métodos de fabricación y sus aplicaciones específicas. Por otro lado, los pilotes colados o barrenados se diferencian entre ademados o no ademados. Los primeros son aquellos

en los que se utiliza una camisa o un tubo de acero (ademe) durante la perforación y el colado del concreto. Este método es particularmente útil en terrenos inestables o con presencia de agua subterránea, dado que el ademe previene el colapso de las paredes del barreno y evita la contaminación del concreto con agua o suelo. Una vez que se coloca el concreto, el ademe puede retirarse o dejarse en su lugar, lo que depende del diseño. Los pilotes con ademe tienen las siguientes características:

- Longitud referencial: 5 a 15 m.
- Longitud máxima: 30 a 40 m.
- Carga referencial: 200 a 500 kN.
- Carga máxima aproximada: 800 kN.

En contraste, los pilotes no ademados, también conocidos como pilotes barridos, se construyen sin el uso de un ademe. Este método se aplica en terrenos estables, donde las paredes del barreno pueden mantenerse sin soporte adicional durante el proceso de colado del concreto. Asimismo, los pilotes con ademe tienen las siguientes características:

- Longitud referencial: 5 a 15 m.
- Longitud máxima: 30 a 40 m.
- Carga referencial: 300 a 500 kN.
- Carga máxima aproximada: 700 kN.

En la Figura 12 se muestra una variedad de pilotes colados *in situ*. Braja (2012) explicó que las figuras 12a, 12b, 12c y 12d son claros ejemplos de pilotes con ademe sin pedestal; y en la 12e se puede apreciar un pilote con ademe, donde se incluye el pedestal, el cual es un bulbo que se crea al dejar caer el martillo sobre el concreto fresco, lo que hace que este se expanda y dé forma a dicho pedestal. Finalmente, en las figuras 12e y 12f se muestran pilotes de ademe con y sin pedestal.

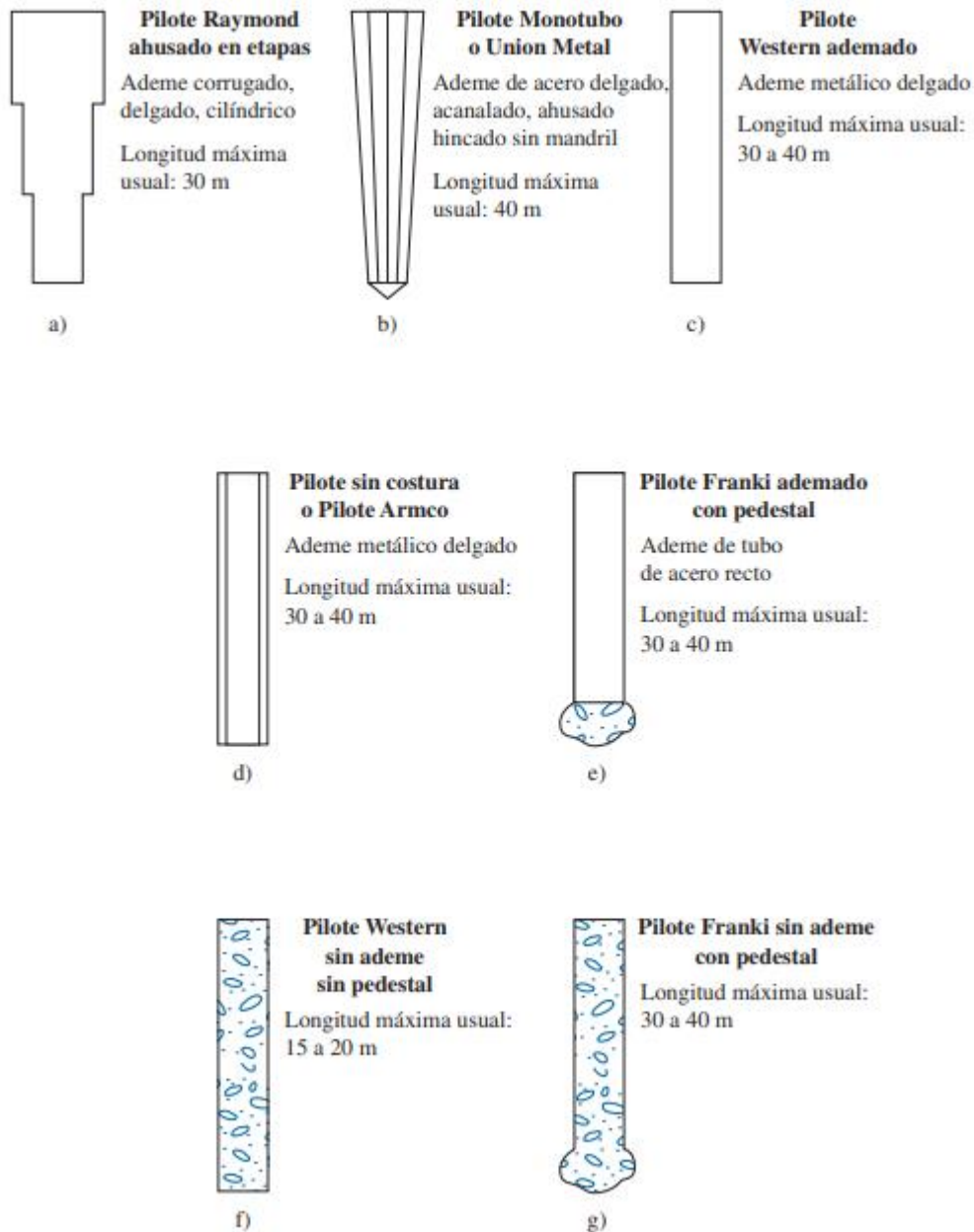


Figura 12 Tipos de pilotes de concreto colados in situ con ademe y sin ademe.

Nota. Tomado de *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, por M. Braja, 2012, CENGAGE Learning.

1.3.1.1 Pilotes de carga de punta

Si los registros de perforación del suelo indican la existencia de lecho rocoso o material rocoso a una profundidad razonable en un sitio determinado, los pilotes pueden extenderse hasta la superficie de dicha roca (Braja, 2012). La capacidad última de los pilotes está directamente relacionada con la capacidad de carga del material

subyacente; por lo tanto, se les denomina pilotes de carga de punta. En la mayoría de estos casos, la longitud requerida del pilote puede determinarse con facilidad (Figura 13a). Ante esto, Braja (2012) indicó que, si en lugar de un lecho de roca se detecta un estrato muy compacto y duro a una profundidad razonable, los pilotes pueden extenderse varios metros hacia adentro, como se puede apreciar en la Figura 13b.

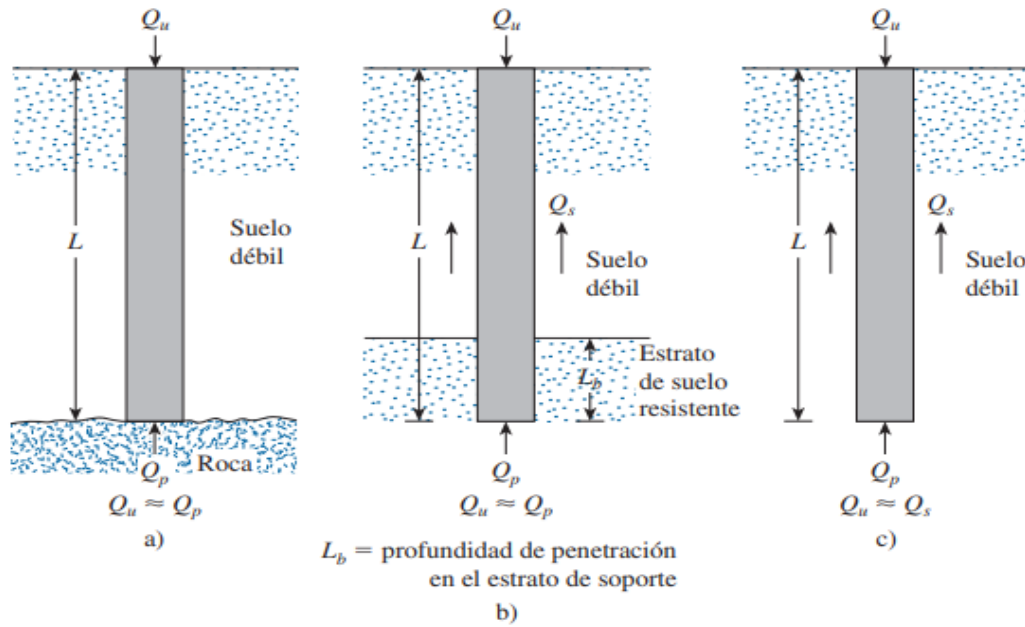


Figura 13 Pilotes de carga de punta y pilotes de fricción.

Nota. Tomado de *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, por M. Braja, 2012, CENGAGE Learning.

1.3.1.2 Pilotes por fricción

Cuando no se detecta un estrato de roca o material rocoso a una profundidad razonable en un emplazamiento, los pilotes de carga de punta resultan demasiado largos y poco económicos. En este tipo de subsuelo, los pilotes se hincan a través del material más suave hasta alcanzar las profundidades especificadas (Figura 13c). Tales pilotes se conocen como pilotes de fricción, pues gran parte de su capacidad de resistencia proviene de la fricción superficial. No obstante, aunque el concepto de "pilote de fricción" es común en la literatura técnica, resulta inapropiado: en suelos arcillosos, la resistencia a la carga aplicada también se debe a la adhesión (Braja, 2012).

Capítulo II. Fundamentos teóricos

2.1 Pilotes inyectados

Los pilotes son elementos de construcción usados para realizar la cimentación de obras, dado que permiten trasladar las cargas hasta un estrato resistente del suelo; en ese sentido, tienen la función de transmitir la acción de las cargas concentradas o distribuidas en estructuras costeras, torres de transmisión, edificios altos, muros de tierra, puentes, puertos, entre otros, hasta el nivel del suelo o la roca sólida competente (Souza y Querelli, 2023). Según Yepes (2019), los pilotes se utilizan cuando no es posible llevar a cabo una cimentación superficial; y, según la forma de trabajo, los pilotes pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Pilotes por punta: estos pilotes llegan hasta un estrato firme; transmiten las cargas directamente a través de la punta y se comprimen. El terreno alrededor ayuda a prevenir el pandeo. Debido a su rigidez, la deformación de los pilotes es mínima, por lo que el movimiento relativo con el terreno es poco significativo. También se les conoce como pilotes columna.
- Pilotes por fuste: en este caso, los pilotes no llegan a un estrato resistente y transmiten la carga al terreno circundante mediante fricción a lo largo del fuste. También se les denomina pilotes flotantes o de fricción.

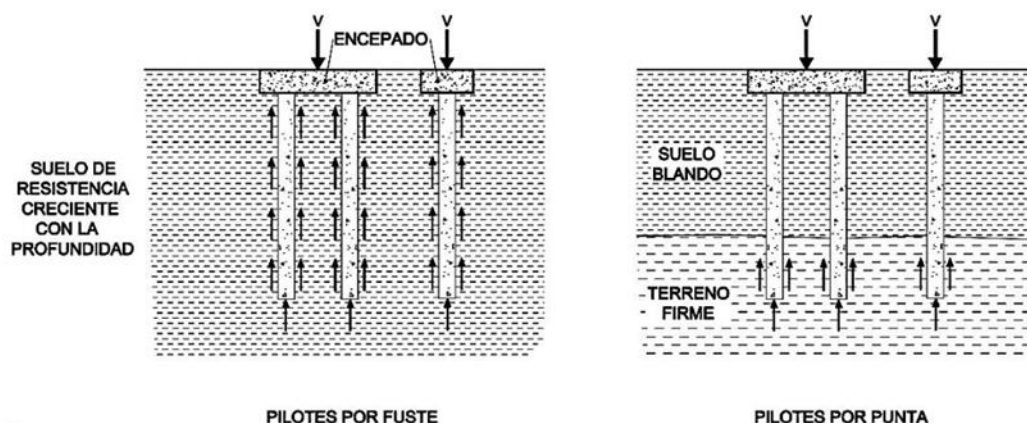


Figura 14 Esquema de cimentaciones de pilotes.

Nota. Tomado de *Concepto de pilote y clasificaciones*, por V. Yepes, 2019, <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/01/17/concepto-de-pilote-y-clasificaciones/>

Por otra parte, la inyección consiste en la introducción de un fluido bajo presión en el terreno, ya sea entre rocas o en el suelo. Entre los diferentes propósitos de este proceso, se pueden incluir los siguientes: compactar el terreno, impermeabilizar, consolidar, llenar cavidades y compensar asentamientos (Vallarino et al., 2023).

De acuerdo con Yepes (2019), hay diversos tipos de pilotes. Por ejemplo, cuando se inyecta microhormigón o mortero sobre este material que ha sido perforado o hincado, por lo general, la lechada incluye aditivos, con una proporción de agua/cemento que varía entre los valores de 0.4 y 0.55. En la Figura 15 se presentan tres tipos de pilotes.

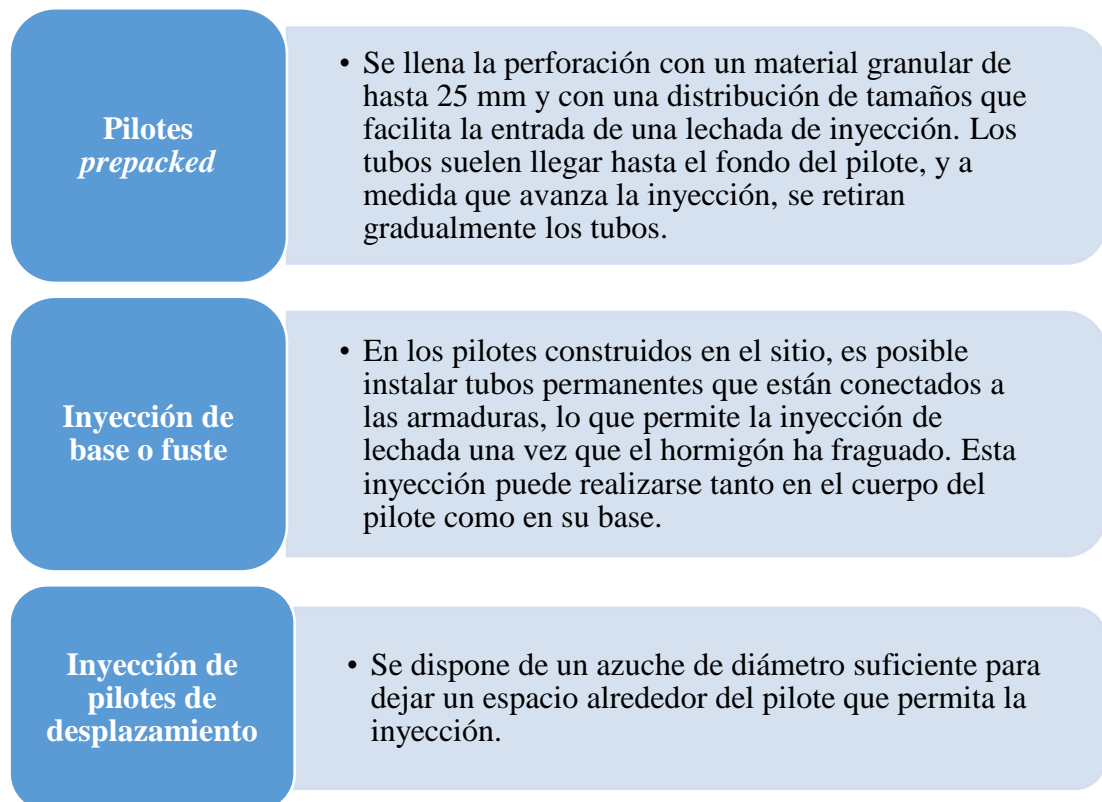


Figura 15 *Tipos de pilotes.*

Nota. Tomado de *Concepto de pilote y clasificaciones*, por V. Yepes, 2019, <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/01/17/concepto-de-pilote-y-clasificaciones/>

De acuerdo con Useche et al. (2022), los pilotes inyectados forman parte de un método comúnmente usado para minimizar el efecto de los materiales sueltos en pilotes perforados, como el ablandamiento por la excavación y la incompatibilidad en la deformación. En ese orden de ideas, y pese a que hay métodos analíticos de diseño de pilotes perforados que han sido mejorados con esta técnica, es necesario que se desarrollen métodos donde se incluyan condiciones más amplias, como la variación de

presiones en la lechada, los diferentes tipos de suelo, la forma del bulbo en la punta del pilote, el volumen de la lechada, y la lechada que asciende entre el pilote y el suelo circundante.

Por lo general, el proceso de inyección se lleva a cabo en fases donde la presión de inyección se incrementa gradualmente y se reduce la proporción de agua/cemento en la lechada. Dado esto, es importante indicar que la presión máxima de inyección se determina según la máxima resistencia por fricción del pilote, la cual debe contrarrestar la fuerza ascendente que se produce en la punta del pilote durante la inyección (Useche et al., 2022).

Por consiguiente, esta técnica es muy efectiva en aquellos suelos granulares que contienen densidades entre bajas y medias, pues estos son más susceptibles a inyectarse por la lechada debido a su alta permeabilidad. Por tanto, los pilotes con inyección de lechada cementicia han sido usados con éxito durante las últimas décadas (Herrera, 2019).

2.2 Geotextil

Un geotextil consiste en una tela permeable y con características resistentes y flexibles de fibras sintéticas. Entre los polímeros, se utilizan especialmente el poliéster y el polipropileno, los cuales sirven para separar tierras que contienen distintas granulometrías, a fin de estabilizar el terreno y proteger las láminas impermeabilizantes. Estas telas también pueden separar elementos finos con materiales granulares, los cuales se usan como refuerzos para conseguir grandes resultados (León, 2021).

De acuerdo con Quijije (2019), los geotextiles corresponden a materiales planos, permeables y hechos por polímeros, ya sean sintéticos o naturales; y poseen un espesor de entre 1.5 y 2 mm. Estos se pueden utilizar en cimentaciones, taludes y vías con el propósito de aumentar su resistencia al aplicar alguna carga. Además, el polipropileno es un material más ligero que el agua, durable y resistente, por lo que sus fibras y filamentos se pueden usar para elaborar geotextiles. Finalmente, en el caso del poliéster, este es un material más pesado que el agua, pero su resistencia es buena; posee propiedades de deslizamiento y es compatible con materiales naturales (Icochea, 2019).

Por su parte, Grados y Serrano (2023) mencionaron que los geotextiles son una solución para una variedad de retos, pues mejoran el rendimiento y reducen los costos de varias estructuras (carreteras, drenajes subterráneos, rellenos sanitarios, terraplenes y vías férreas). Asimismo, en la jerarquía de los suelos, su objetivo primordial es mejorar las propiedades mecánicas del terreno, a fin de lograr una adecuada combinación de los materiales con alta resistencia.

2.2.1 Clasificación de geotextiles

Según el proceso de fabricación, los geotextiles pueden ser tejidos y no tejidos, como se muestra en la Figura 16.

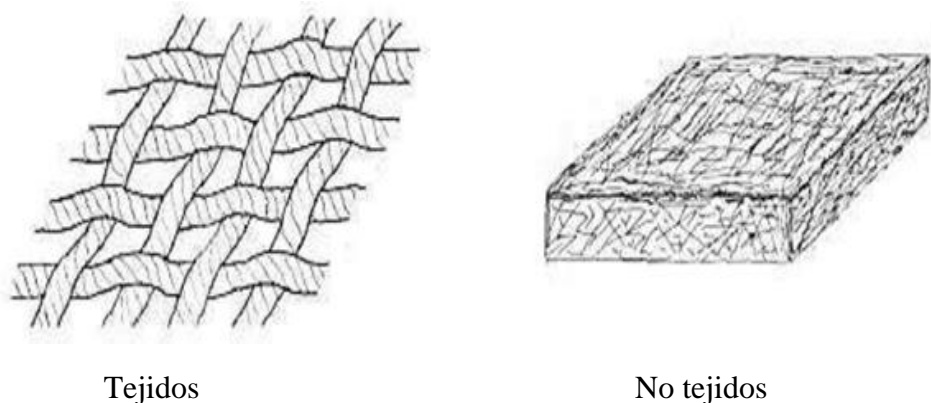


Figura 16 Clasificación de geotextiles.

Nota. Tomado de *Reforzamiento del suelo con la utilización de geotextiles y geomallas aplicado en la ciudad de Manta*, por A. Quijije, 2019, <https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/2085/1/ULEAM-IC-0046.pdf>

El geotextil tejido se compone por cintas de polipropileno puestas tanto en dirección longitudinal como transversal por medio de un proceso textil que se considera el más sencillo y efectivo. Esto da como resultado una estructura plana que contiene una resistencia adecuada y una reducida deformación bajo tracción biaxial, específicamente diseñada en dos direcciones durante su elaboración (Jaramillo y Olaya, 2020).

Ante esto, Quijije (2019) sostuvo que el geotextil tejido se fabrica por procesos convencionales de tejido, cuyo propósito principal es actuar como elemento de refuerzo y separación de suelos. Se trata del tejido más eficiente y simple que da una estructura plana como resultado; y, de acuerdo con su tipo, puede clasificarse así:

- Geotextiles tejidos a partir de filamentos únicos, denominados monofilamentos.
- Geotextiles tejidos a partir de filamentos múltiples.

El espesor de los geotextiles tejidos por monofilamentos o filamentos múltiples es de 1 a 2 mm, y los elementos más comunes para su proceso de fabricación son los fibrilados. Por otra parte, el tejido corresponde a un proceso de hilos entrelazados para la elaboración de una tela, mientras que las fibras se orientan en dos direcciones. De esa manera, los tejidos se hacen mediante monofilamentos, multifilamentos o fibras cortas, y estas últimas pueden dividirse en cintas planas y tejidos fibrilados, también denominados tejidos de tela de araña (Vargas, 2020).

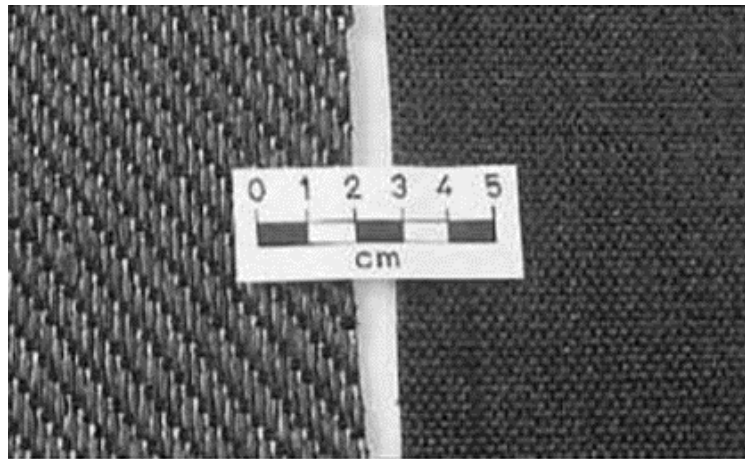


Figura 17 Geotextil tejido.

Nota. Tomado de *Estado del arte: una visualización al desarrollo de geotextiles y suelos transparentes*, por N. Vargas, 2020, <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/42fa54a5-1195-4d56-b66f-b5d29a587c93/content>

En cuanto al geotextil no tejido, este se produce a través de un entrelazado de fibras y filamentos de polipropileno virgen y se incorpora de manera mecánica mediante un proceso de punzonado con agua, lo cual resulta en un material que contiene excelentes propiedades de filtración y drenaje, y ello le confiere características hidráulicas por su estructura tridimensional (Quijije, 2019). En la Figura 18 se presentan dos geotextiles no tejidos: a la derecha se tiene el polipropileno, y a la izquierda el poliéster.

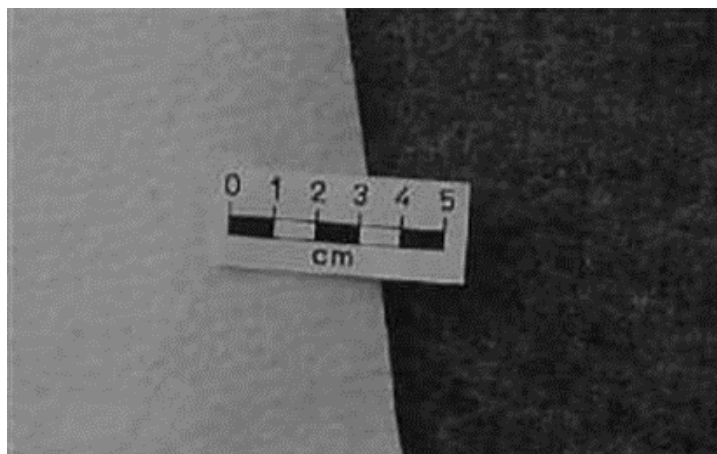


Figura 18 Geotextil no tejido.

Nota. Tomado de *Reforzamiento del suelo con la utilización de geotextiles y geomallas aplicado en la ciudad de Manta*, por A. Quijije, 2019, <https://repositorio.ulead.edu.ec/bitstream/123456789/2085/1/ULEAM-IC-0046.pdf>

Con respecto a las aplicaciones más representativas de los geotextiles, estas se dan de acuerdo con la función que cumplen: separación, refuerzo, filtración y drenaje (Figura 19).

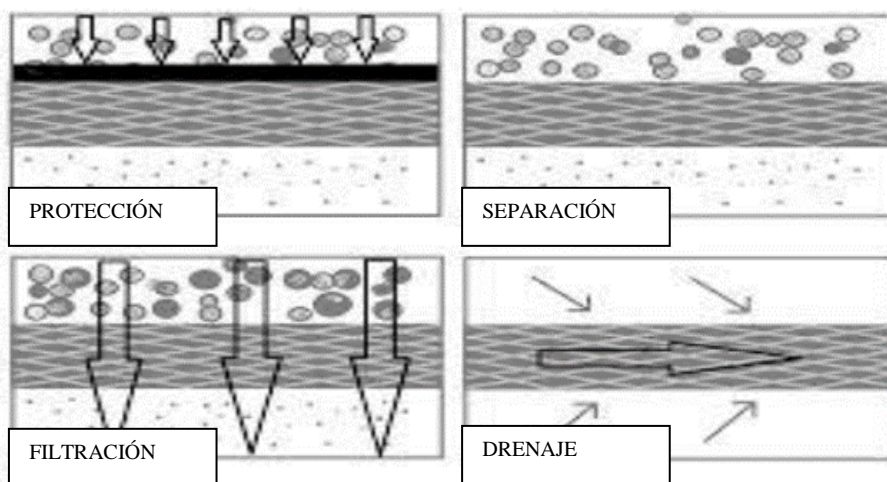


Figura 19 Aplicaciones del geotextil no tejido.

Nota. Tomado de *Diseño de un pavimento flexible con geotextil tejido en las calles Los Cipreses y Los Pinos del asentamiento humano Consuelo de Velasco, Piura 2019*, por K. Jaramillo y B. Olaya, 2020, <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/52207>

De acuerdo con Jaramillo y Olaya (2020), estas aplicaciones se describen de la siguiente manera:

- Separación: consiste en preservar las propiedades diferenciadoras de dos materiales distintos al mantenerlos juntos sin ser mezclados, con lo que se evitan la reducción de la resistencia y la capacidad de drenaje de la estructura.
- Refuerzo: implica la proporción al suelo de un refuerzo adicional que aumenta su resistencia a la tracción, lo cual es beneficioso especialmente en suelos como limos o arcillas.
- Filtración: el geotextil se selecciona generalmente por su permeabilidad y se adapta a los requerimientos o especificaciones del proyecto con el fin de prevenir la mezcla de capas y permitir un mínimo paso de líquidos. Esto contribuye a evitar la pérdida de suelo y, además, a mantener la integridad estructural mediante la reducción de la erosión.
- Drenaje: consiste en el proceso de captación y conducción de fluidos dentro del plano del geotextil.

En concordancia con lo anterior, Vite (2019) mencionó que los geotextiles no tejidos son recomendables para su utilización en el control de la erosión y el drenaje del subsuelo, así como para estabilizar los caminos sobre suelos húmedos. Estos últimos pueden ser:

- Agujereados o punzonados: los filamentos se reúnen por medio de la unión mecánica que se realiza por medio de agujas dispuestas en la parte de arriba y debajo de la napa de filamentos, las cuales ingresan y salen a una velocidad alta, a fin de conectar los filamentos.
- Termosoldados: los filamentos se unen por medio del calor, lo cual ocurre por un proceso de termofusión.

Por otra parte, según Quijije (2019), pueden existir geotextiles mixtos, donde la malla se compone de fibras cortadas que pueden ser agujadas y agujadas-termoselladas. Estas se describen a continuación:

- Los geotextiles agujados de fibra cortada no se someten al proceso de termofusión, sino que corresponden a materiales con resistencia mecánica mínima, dado que, al no existir una unión entre sus elementos, no se encuentran

ligados entre sí y es posible que se perforen con facilidad si se aplica sobre ellos una fuerza perpendicular ante la que no se ofrece resistencia.

- Los geotextiles agujados de filamento continuo y termisoldados contienen una resistencia mecánica alta que les ayuda a evitar la rotura, y poseen espesores que les permiten cumplir con la función de drenaje y protección. Además, estos funcionan con un efecto colchón.



Figura 20 *Geotextil tejido y no tejido.*

Nota. Tomado de *Reforzamiento del suelo con la utilización de geotextiles y geomallas aplicado en la ciudad de Manta*, por A. Quijije, 2019, <https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/2085/1/ULEAM-IC-0046.pdf>

2.2.2 *Propiedades de los geotextiles*

En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los geotextiles tejidos y no tejidos, lo cual evidencia la existencia de diferencias significativas en sus valores.

Tabla 1
Propiedades de los geotextiles

| Propiedades | Geotextil tejido | Geotextil no tejido |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Resistencia a la tracción (KN/m) | 30 | 8 |
| Estiramiento a la rotura (%) | 15 | 45-55 |
| Abertura de poros (mm) | 0.28 | 0.26 |

Nota. Elaboración propia, adaptado de *Reforzamiento del suelo con la utilización de geotextiles y geomallas aplicado en la ciudad de Manta*, por A. Quijije, 2019, <https://repositorio.ulead.edu.ec/bitstream/123456789/2085/1/ULEAM-IC-0046.pdf>

2.3 Columna de grava

Las columnas de grava se definen como un método para la estabilización para suelos inestables, donde se insertan elementos cilíndricos verticales en el suelo por medio del uso de grava como material de consolidación. Se trata de un sistema que puede adaptarse a diversos tipos de cimentaciones superficiales y es aplicable en diferentes estructuras con uso variado (Castro, 2021).

El perfil estándar del sistema de columnas de grava se diseña para su uso debajo de estructuras que contengan carga distribuida, como losas o terraplenes. Además, las columnas de grava se pueden complementar con geomallas y una plataforma de transferencia de cargas para lograr una mejor homogeneidad y reducir el total de asentamientos debajo de la estructura; por ello son efectivas para estabilizar los suelos en los que se colocan cargas específicas, como zapatas de cimentación, o cargas distribuidas en línea, como muros de contención (Lavado, 2024). En la Figura 21 se presenta el perfil estándar del sistema.

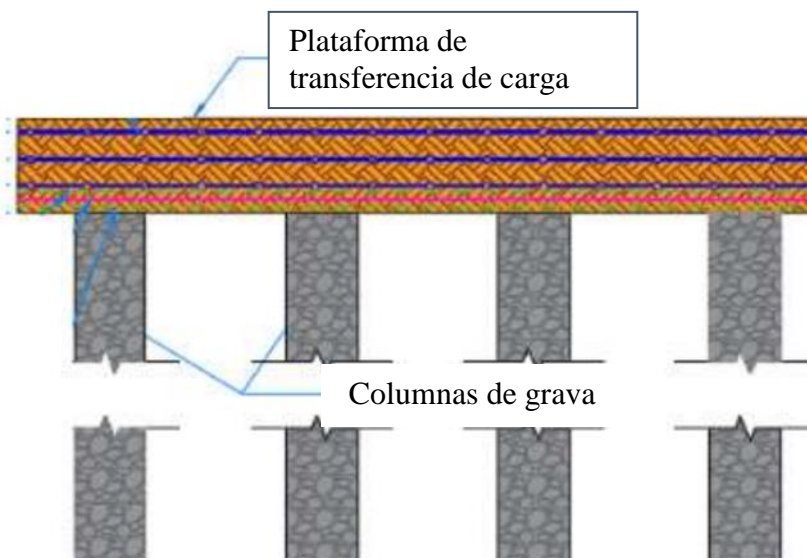


Figura 21 Distribución de las columnas de grava sobre una plataforma de transferencia.

Nota. Tomado de *Efectos del uso de las columnas de grava como reforzamiento de terreno para la reducción de asentamiento y mejoramiento de capacidad de carga en la construcción de una cámara de bombeo*, por R. Lavado, 2024, <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/dc5fecc3-9d52-410a-b259-51efc59bb03a>

2.3.1 Aplicaciones de la columna de grava

De acuerdo con García et al. (2019), se destacan tres efectos de mejoramiento que las columnas de grava aportan al suelo: el refuerzo, la densificación y el drenaje.

- Refuerzo: este efecto ocurre por el uso de un suelo más resistente que el natural, capaz de soportar tensiones tangenciales, normales o de corte más elevado sin experimentar deformaciones significativas en comparación con el suelo natural. La Figura 22 presenta el factor K_G , que es el cociente entre el CSR mejorado y el CSR inicial, donde el CSR corresponde a la tensión tangencial máxima por la acción cíclica que equivale al sismo de diseño.

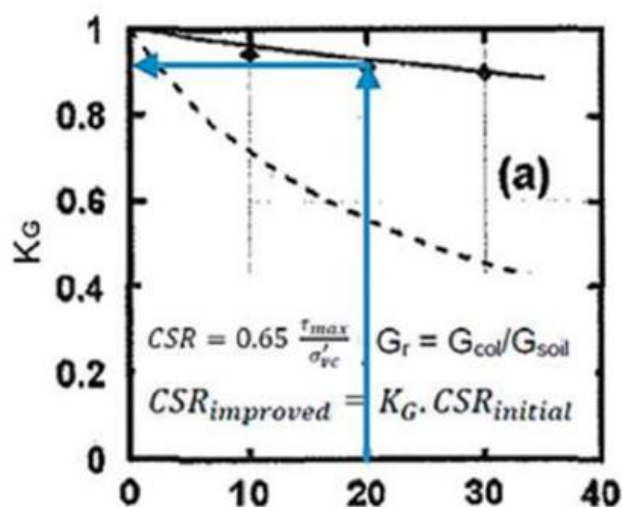


Figura 22 Refuerzo.

Nota. Tomado de “Análisis de licuefacción y mitigación con columnas de grava”, por M. García et al., 2019, *Revista Digital del Cedex*, 193.

- Densificación: se logra una mejora del suelo por densificación a causa de la vibración del terreno y la introducción de grava en el suelo sin necesidad de extraerlo del entorno natural. En la Figura 23 se muestra una mejora en la

resistencia a la penetración estándar luego del tratamiento. Donde A_r corresponde al área de reemplazo y $N_{1,60}$ es *post-improvement*.

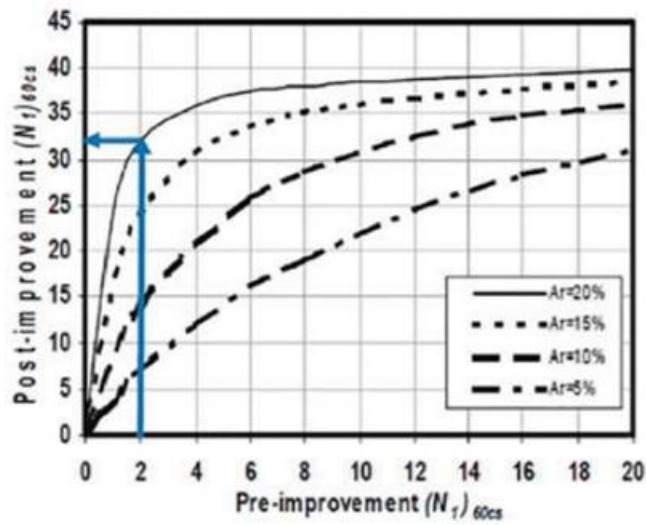
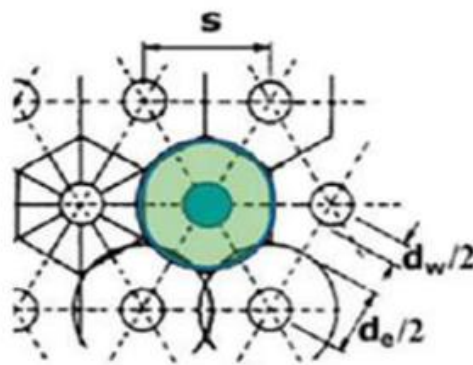


Figura 23 Densificación.

Nota. Tomado de “Análisis de licuefacción y mitigación con columnas de grava”, por M. García et al., 2019, *Revista Digital del Cedex*, 193.

- Drenaje: el drenaje juega un papel fundamental para la prevención de la licuefacción del suelo, dado que la presencia de grava conlleva el aumento de la permeabilidad del terreno, lo cual facilita la disipación de presiones de poro durante un sismo. Esto puede evitar la acumulación de presiones y puede ayudar a mantener las tensiones efectivas en el suelo; por consiguiente, la Figura 24 evidencia los tres tipos de distribuciones de las columnas de grava.



Triangular Installation

$$d_e = 1.053 \cdot s$$

Figura 24 Drenaje.

Nota. Tomado de “Análisis de licuefacción y mitigación con columnas de grava”, por M. García et al., 2019, *Revista Digital del Cedex*, 193.

Asimismo, a continuación se presentan algunas de las estructuras que utilizan columnas de grava.

- Terraplenes: las columnas de grava se utilizan en la construcción de terraplenes para infraestructuras lineales en caso de que se presenten problemas de estabilidad. Además, estas se han empleado para la elaboración de carreteras adyacentes a terraplenes que ya existen (Valdiviezo, 2019).

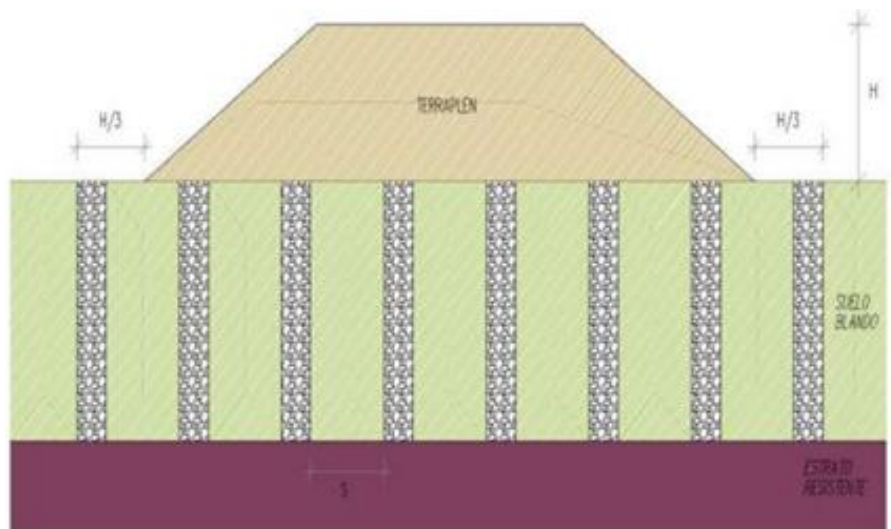


Figura 25 Aplicación de la columna de grava en terraplenes.

Nota. Tomado de *Uso de columnas de grava compactada para aumentar la capacidad portante del suelo en la avenida Sánchez Cerro entre la avenida Chulucanas y avenida Mártires de Uchuraccay, ubicada en el distrito de Piura –provincia de Piura– departamento de Piura*, por K. Valdiviezo, 2019, https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP_65f2e3e74cab941597cfb3a35c1956d4/Description#tabnav

- Tanques: la instalación de pilotes puede resultar costosa en estas estructuras por su extensa superficie. Por eso, y para mitigar los asentamientos, una alternativa común es usar columnas de grava, de forma que estas atraviesen el suelo inestable y alcancen un estrato más firme. Luego, se puede colocar una

losa superficial de cimentación sobre una capa de distribución o relleno consolidado (Cirion y Chatte, 2019).

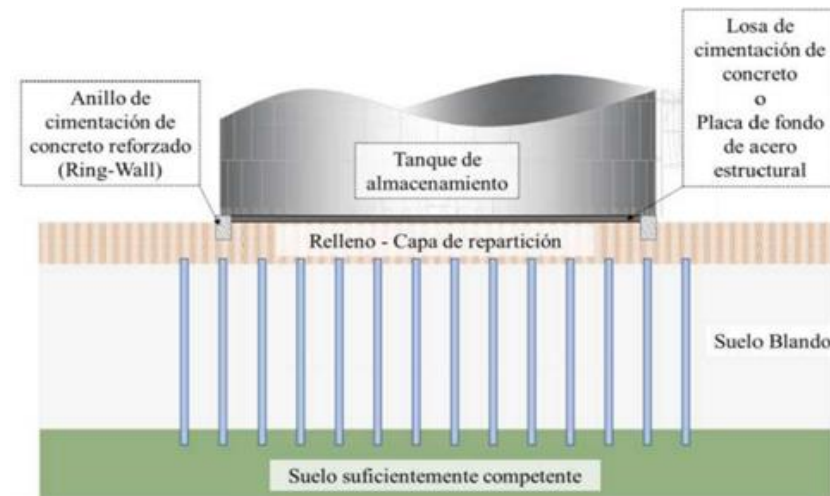


Figura 26 Columnas de grava en cimentación de un tanque de almacenamiento.

Nota. Tomado de “Aplicación de columnas de módulo controlado como cimentación para tanques en zonas sísmicas”, por A. Cirion y R. Chatte, 2019, *Geotechnical engineering in the XXI century: lessons learned and future challenges*.

- Edificaciones ligeras y extensas: incluir columnas de grava en la construcción de edificaciones resulta beneficioso para aumentar la capacidad de estabilidad y la carga del suelo bajo las cimentaciones, lo cual contribuye a una distribución más uniforme de las cargas, y con ello se reducen los asentamientos diferenciales. Por tanto, las columnas de grava son capaces de adaptarse a diversas formas de cimentación directa, como zapatas aisladas, zapatas corridas o losas, según sea el caso (Valdiviezo, 2019).

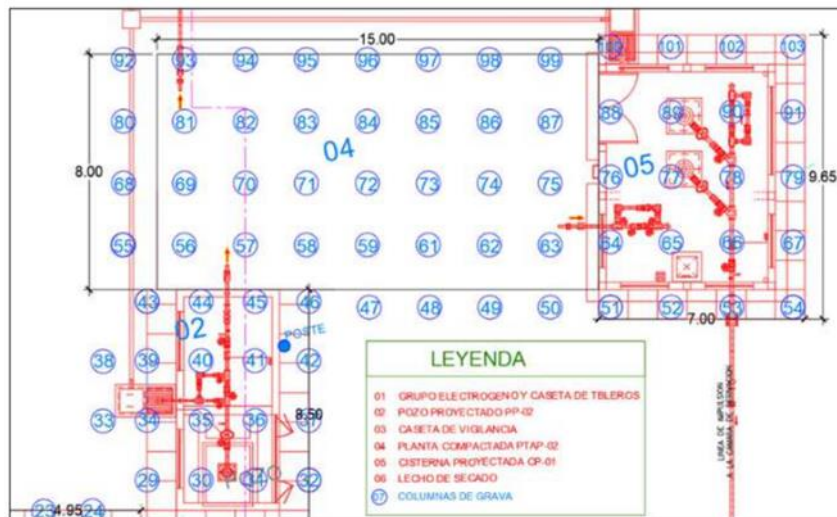


Figura 27 Distribución de columnas de grava en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP).

Nota. Tomado de *Uso de columnas de grava compactada para aumentar la capacidad portante del suelo en la avenida Sánchez Cerro entre la avenida Chulucanas y avenida Mártires de Uchuraccay, ubicada en el distrito de Piura –provincia de Piura– departamento de Piura,* por K. Valdiviezo, 2019, https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP_65f2e3e74cab941597cfb3a35c1956d4/Description#tabnav

- Medio marítimo: se emplean columnas de grava en entornos marinos con el fin de fortalecer las cimentaciones de rellenos portuarios, diques, muelles, etc. Estas ofrecen ventajas económicas en comparación con los métodos convencionales, como el dragado y el uso de banquetas granulares, puesto que mejoran la capacidad de carga, reducen la subsidencia, previenen la erosión y aumentan la estabilidad del terreno (Valdiviezo, 2019).



Figura 28 *Instalación de columnas de grava en el mar.*

Nota. Tomado de *Efectos del uso de las columnas de grava como reforzamiento de terreno para la reducción de asentamiento y mejoramiento de capacidad de carga en la construcción de una cámara de bombeo*, por R. Lavado, 2024, <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/dc5fecc3-9d52-410a-b259-51efc59bb03a>

2.3.2 *Beneficios del uso de columna de grava*

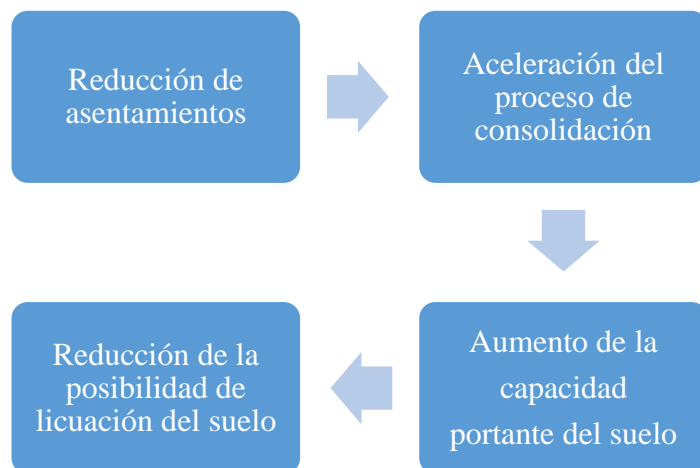


Figura 29 *Beneficios de las columnas de grava.*

Nota. Tomado de *Propuesta de mejoramiento de suelos licuables mediante el uso de columnas de grava en áreas portuarias - Puerto del Callao*, por P. Falla, 2021, <https://upc.aws.openrepository.com/handle/10757/655860>

De acuerdo con Falla (2021), los anteriores beneficios representan lo siguiente:

- Se produce una reducción de asentamientos a causa de que las columnas son elementos rígidos insertados en un suelo menos resistente, lo cual provoca una redistribución de la carga aplicada en el área. Además, las columnas pueden absorber una porción significativa de la carga total, lo cual da como resultado una reducción en la carga del suelo blando, y ello a su vez conlleva una distribución más uniforme del asentamiento y una disminución de este.
- Se presenta una aceleración en el proceso de consolidación, debido a que las columnas de grava pueden funcionar como grandes drenes verticales gracias a su alta permeabilidad, característica que les permite reducir significativamente la distancia de drenaje en el terreno y acelerar el proceso de consolidación bajo cargas aplicadas, puesto que facilitan un flujo radial hacia ellas.
- Se evidencia un incremento de la capacidad portante del suelo, puesto que la inclusión de columnas hechas de un material más resistente dentro de un suelo blando aumenta su capacidad de carga y mejora la resistencia.
- Se lleva a cabo una reducción de la posibilidad de licuación del suelo, en tanto que la capacidad de las columnas de grava para mitigar la licuefacción del suelo las convierte en una opción efectiva en áreas con alta actividad sísmica. De esa forma, estas conservan su integridad estructural y su habilidad para disipar las presiones intersticiales, incluso frente a las fuerzas de cizallamiento provocadas por eventos naturales, como los terremotos.

2.4 Camisa o revestimiento del pilote

La camisa o el revestimiento del pilote corresponde a una estructura metálica o de otro material resistente que se coloca alrededor de un pilote durante su instalación para proporcionarle estabilidad al suelo circundante. Es así como este revestimiento busca proteger el pilote durante el proceso de perforación o hinca, a fin de evitar el colapso del suelo alrededor y garantizar la adecuada instalación del pilote en la posición señalada (Loayza, 2019).

2.4.1 Funciones principales del revestimiento del pilote

De acuerdo con García (2021), entre las funciones principales del revestimiento del pilote se encuentran las siguientes:

- Protección en el proceso de instalación: se protege el pilote durante el proceso de perforación o hincado en el suelo contra daños mecánicos y se contribuye a evitar el colapso del suelo alrededor, lo cual es importante especialmente en suelos cohesivos o sueltos, donde el pilote podría desplazar el material circundante en caso de no encontrarse protegido adecuadamente.
- Estabilidad permanente y/o temporal: puede proporcionar estabilidad temporal en el proceso de instalación del pilote o permanente cuando el pilote se encuentra en servicio; ello, según su aplicación y diseño. Esto es fundamental para garantizar que el pilote mantenga su capacidad de carga diseñada para su ciclo de vida.
- Mejora en la capacidad de carga: en determinados casos, el revestimiento puede mejorar la capacidad al redistribuir las cargas aplicadas de una forma más eficiente en el suelo circundante. Esto contribuye a la reducción de asentamientos diferenciales y ayuda a la mejora de la estabilidad de la estructura construida sobre los pilotes.

2.4.2 Métodos constructivos

2.4.2.1 Columnas de grava por medio del uso de vibradores profundos

Uno de los métodos para construir columnas de grava es el que se basa en la utilización de vibradores profundos. Este es el caso de la vibrosustitución vía húmeda, la cual se emplea cuando el estrato posee un nivel alto freático o cuando hay inestabilidad en las paredes de la perforación. El proceso se caracteriza por el uso de un vibrador mecánico que se implanta por su propio peso en el terreno, y luego se añade agua a alta presión desde la punta del vibrador, con el fin de contribuir a la penetración en el suelo. Según Pilote Terratest (2020), el proceso es el siguiente:

- El vibrador se introduce en el suelo por su propio peso, se emplean la vibración y el agua a alta presión para barrer. Luego de alcanzar la profundidad requerida, se vierte grava en la superficie.
- Se retira el vibrador gradualmente por medio de movimientos ascendentes y descendentes, de manera que la grava pase a través del espacio entre el vibrador y el suelo, y después se compacta contra el suelo.

- La retirada lenta y por etapas del vibrador forma una columna compactada cuyo tamaño varía de acuerdo con las propiedades del suelo y la intensidad de la vibración utilizada.

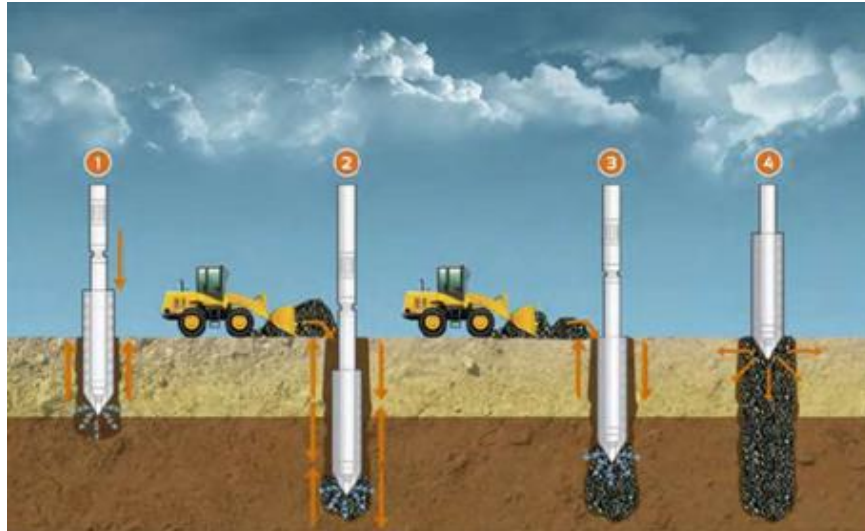


Figura 30 Método de vibro-sustitución para la instalación de columnas de grava.

Nota. Tomado de *Columnas de grava. Vibrosustitución y vibrocompactación*, por Pilote Terratest, 2020, <https://www.terratest.cl/wp-content/uploads/2020/02/Catalogo-Pilotes-terratest-columna-de-grava.pdf>

De acuerdo con Ruiz y Pineda (2022), otro método es el vibro-desplazamiento por vía seca, el cual se usa para instituir las columnas de grava en terrenos cohesivos estables no sensitivos, en caso de que el nivel freático sea profundo. Además, este proceso se caracteriza por el uso de un vibrador con aire y una potencia comprimida que permite mandar la grava hasta la punta del vibrador para asegurar una compacidad máxima y la continuidad de las columnas. A continuación, se presentan los pasos de este método:

- Se coloca el vibrador en el punto de hincado y se introduce en el terreno por su peso, vibración y aire comprimido.
- El vibrador se desplaza de manera vertical a la tolva de grava y se procede a descargar la grava sobre una tolva superior que lleva al tubo de alimentación hasta llegar a la punta inferior del vibrador. Luego de alcanzar la profundidad de hincado, se levanta ligeramente el vibrador, al tiempo que la grava aportada por medio del orificio inferior de salida ocupa el espacio vacío.
- El vibrador sigue un movimiento de abajo hacia arriba, lo que facilita que la grava caiga a través del tubo. Después, esta se compacta, y el hincado se realiza

hasta alcanzar la profundidad planeada en el diseño o hasta que se encuentre resistencia.

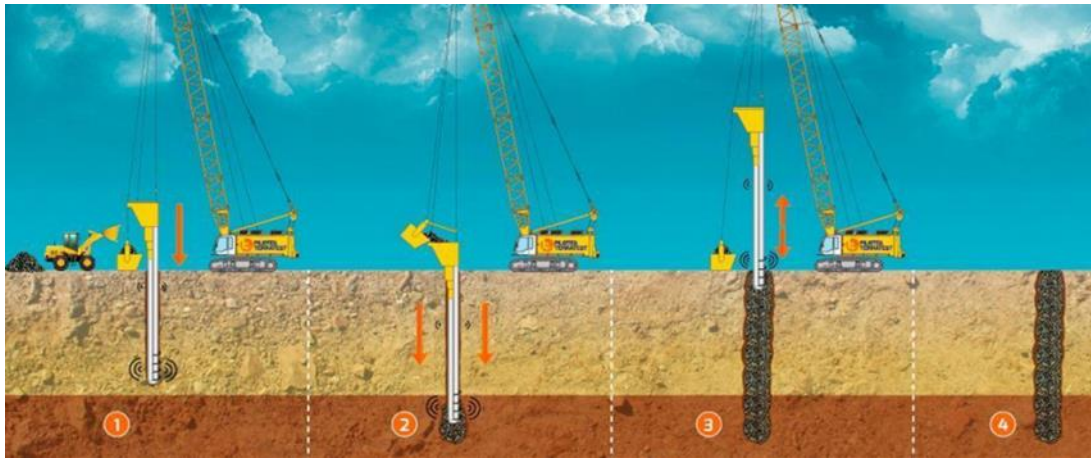


Figura 31 Método de vibro-desplazamiento para la instalación de columnas de grava.

Nota. Tomado de *Análisis de la mitigación de licuefacción del suelo aplicando el diseño de columnas de grava compactada en el Colegio Jacobo, Catacaos, Piura 2022*, por S. Ruiz y E. Pineda, 2022, <https://core.ac.uk/download/561060202.pdf>

2.4.2.2 Columnas de grava en el sector marítimo

Uno de los métodos para la instalación de columnas de grava en el mar es el de la banqueta de grava, el cual requiere una previa ejecución de dicha banqueta por medio del vertido con ganguiles. Por otra parte, el espesor de la banqueta depende del diseño del tratamiento, y se da en función del diámetro, la longitud y la separación que existe entre columnas. En consecuencia, se requiere una mayor cantidad de grava para este sistema que para otros, dado que un porcentaje de esta se queda entre las columnas. A continuación, se detallan algunos puntos importantes de este método, según lo indicado por Caro y Manzanal (2019):

- La manta de grava posee un espesor de entre 3 y 5 m sobre el fondo marino, como se muestra en la Figura 32.

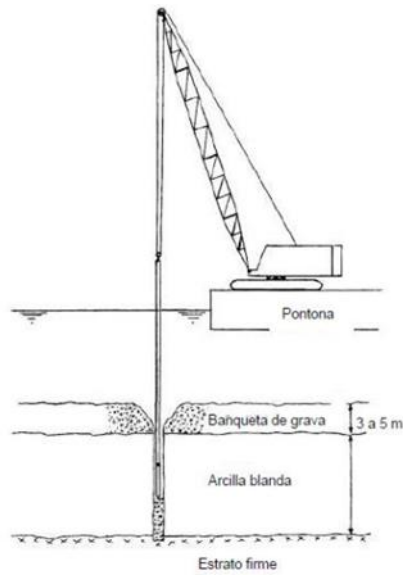


Figura 32 Colchón de materiales de aportación.

Nota. Tomado de *Análisis del comportamiento de estructuras de gravedad para infraestructuras portuarias*, por P. Caro y D. Manzanal, 2019, https://oa.upm.es/58716/1/TFM_PEDRO_CARO_PERDIGON.pdf

- Asimismo, se ejecutan las columnas de grava al introducir el vibrador a través de la capa de banqueta y los suelos cohesivos a tratar, hasta conseguir una capa que ofrezca una resistencia adecuada, como se evidencia en la Figura 33.

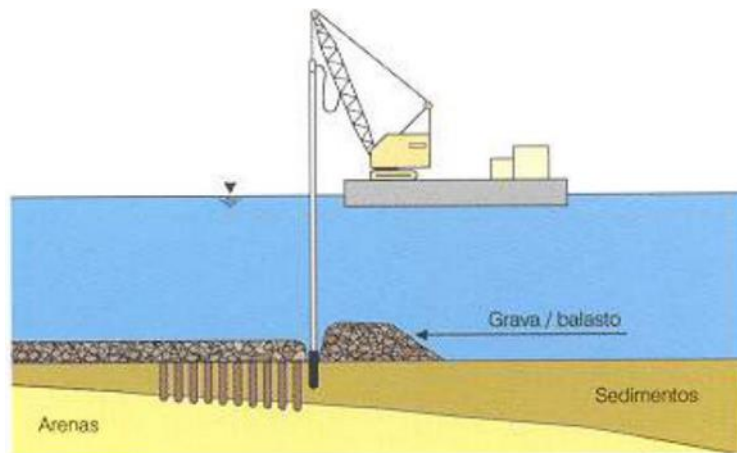


Figura 33 Ejecución de columnas de grava.

Nota. Tomado de *Análisis del comportamiento de estructuras de gravedad para infraestructuras portuarias*, por P. Caro y D. Manzanal, 2019, https://oa.upm.es/58716/1/TFM_PEDRO_CARO_PERDIGON.pdf

- Posteriormente, se levanta el vibrador en rangos de 0.5 a 1 m, y se compacta la grava que cae por el espacio anular entre el vibrador y las paredes del agujero que se forma durante la fase de penetración con lanza agua.

Por medio de este método se pueden crear columnas de hasta 15 m de longitud, con lo que se asegura que las paredes del agujero del suelo tratado permanezcan estables y que la grava se deposite en el fondo de la columna en proceso de formación (Caro y Manzanal, 2019).

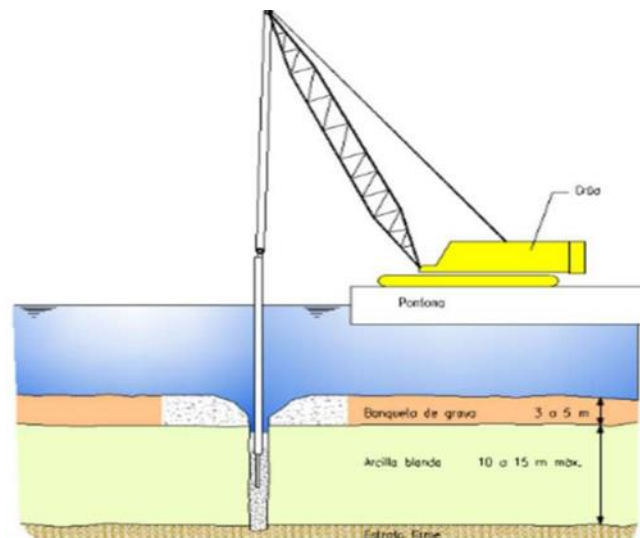


Figura 34 Método con banqueta de grava.

Nota. Tomado de *Análisis del comportamiento de estructuras de gravedad para infraestructuras portuarias*, por P. Caro y D. Manzanal, 2019, https://oa.upm.es/58716/1/TFM_PEDRO_CARO_PERDIGON.pdf

2.5 Inyección de lechada

Este es el proceso que se ejecuta en etapas al aumentar la presión de la inyección de forma sucesiva y al reducir la mezcla agua/cemento de la lechada. En este sentido, la presión máxima se calcula con base en la resistencia de fricción máxima del pilote, la cual debe equilibrar la fuerza ascendente originada en la punta del pilote que posee la inyección (Useche et al., 2022). De acuerdo con Herrera (2019):

La inyección es el proceso por medio del cual se introduce un fluido a presión en el terreno con el objetivo de sustituir el aire o el agua (impermeabilización) y en algunos casos incrementar la resistencia y el módulo de deformabilidad del medio en forma significativa (consolidación). (p. 7)

Este tipo de acciones se utilizan de forma general en elementos como el cemento, el agua y, en algunos casos, los aditivos como la bentonita, que se inyectan en el macizo rocoso. Lo anterior, de acuerdo con el estudio de la calidad de la roca a inyectar (Quito, 2019). Para este proceso, los equipos de inyección son los siguientes.



Figura 35 Equipos de inyección de lechada.

Nota. Tomado de “Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos”, por D. Useche et al., 2022, *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 49.

Como se puede apreciar en la Figura 35, estos son los recursos básicos a contar dentro del proceso de inyección de lechada. Al respecto, se observa que se necesita una máquina operativa que ejecute la fase de mezcla, la cual se vincula a la bomba de inyección, así como una lanza de inyección para desarrollar la acción final. Además, debe indicarse que existen diversos tipos de inyección, los cuales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2
Métodos de inyección de lechada

| Tipos | Descripción |
|-------|-------------|
|-------|-------------|

| | |
|--------------------------------|--|
| Método de inyección previa | La lechada se coloca solo por gravedad, esta no se presuriza. Se usan morteros de arena y cemento y lechadas de cemento puro. |
| Inyección única global | La lechada de cemento se inyecta a presiones en intervalos de 0.3 a 1.0 MPa. |
| Inyección repetitiva | La lechada se coloca por gravedad, entre 15 y 25 minutos más tarde, y antes del endurecimiento se vierte una lechada similar a la anterior, con una presión de al menos 1.0 MPa. |
| Inyección repetitiva selectiva | La lechada se coloca por gravedad. Una vez que esta se endurece, se vierte una lechada similar a la anterior, con una presión entre 2.0 y 8.0 MPa. |

Nota. Elaboración propia, adaptado de “Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento”, por W. Castellanos y E. Rodríguez, 2022, *Revista Ingeniería*, 27(2).

De ese modo, se deduce que hay diferentes métodos para tratar la inyección de lechada por parte del personal, y ello depende de la finalidad que se quiera dar a la ejecución. De forma general, este proceso se aprecia como una introducción de la lechada en los estratos que se aplican para adquirir una determinada resistencia (Flores, 2023). También debe considerarse que el tipo de inyección depende del suelo, por lo que debe considerarse la siguiente información.

Tabla 3*Tipo de inyección de lechada a utilizar según tipo de suelo*

| Tipo de suelo | Tipo de inyección de lechada |
|--|-------------------------------------|
| Rocas sanas, suelos cohesivos muy duros y arcillas rígidas. | Tipo A |
| Rocas más o menos sanas, suelos cohesivos semiduros y suelos granulares. | Tipo B |
| Rocas blandas y fisuradas y en materiales granulares gruesos y de densidad media. | Tipo C |
| Suelos cohesivos (salvo los muy duros), suelos de consistencia baja o media y suelos granulares. | Tipo D |

Nota. Tomado de *Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento*, por W. Castellanos y E. Rodríguez, 2022, *Revista Ingeniería*, 27(2).

Estos datos dan una idea del tipo de inyección de lechada que debe implementarse según la clase de suelo. En ese orden de ideas, se clasifican los suelos por su combinación de rocas y propiedades, y se vincula la inyección para una adecuada perforación e introducción de la lechada en esta superficie.

2.5.1 Técnicas de inyección

De acuerdo con Herrera (2019), se destacan dos tipos de inyecciones: la descendente y la ascendente. La primera implica perforar un taladro hasta una profundidad determinada e inyectarlo en uno o más tramos antes de continuar con la perforación a más profundidades. Posteriormente, se lava y se retira la lechada del taladro, antes de que esta se endurezca, a fin de reducir la obstrucción. Esta técnica se emplea en áreas donde la roca superficial está muy fracturada o donde hay variaciones en el flujo de agua. Según el nivel de precaución requerido, los tramos inferiores pueden inyectarse desde la superficie con presiones elevadas, o los tramos perforados nuevamente pueden sellarse con *packers*, como se muestra en la Figura 36.

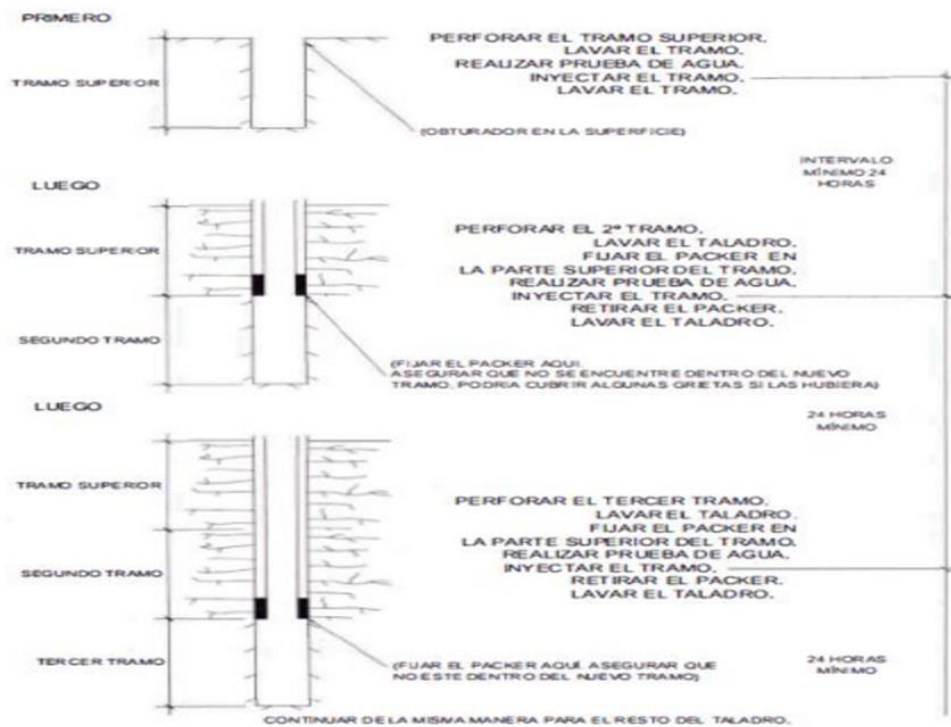


Figura 36 Inyección descendente.

Nota. Tomado de *Impermeabilización mediante inyecciones de cemento en macizo rocoso para evitar la surgencia de agua en explotación subterránea Cajamarca*, por C. Herrera, 2019, <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/21786/Herrera%20de%20la%20Cruz%20Carmen%20Esther.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

Igualmente, la inyección ascendente corresponde al método de inyección más común, y consiste en perforar el pozo de manera continua hasta alcanzar la profundidad total deseada; ello, antes de realizar las pruebas de agua y comenzar con la inyección de lechada. Una vez realizadas las pruebas, se coloca un *packer* en la parte superior del tramo de inyección más bajo, a fin de dar inicio a dicha inyección. Cuando este tramo se inyecta, se observa un rechazo y la presión se estabiliza, el *packer* se mueve hacia el tramo superior siguiente. Este procedimiento es generalmente adecuado cuando no hay dificultades para instalar el *packer* ni problemas de *bypass* en la roca (Herrera, 2019). Esto se ilustra en la Figura 37.

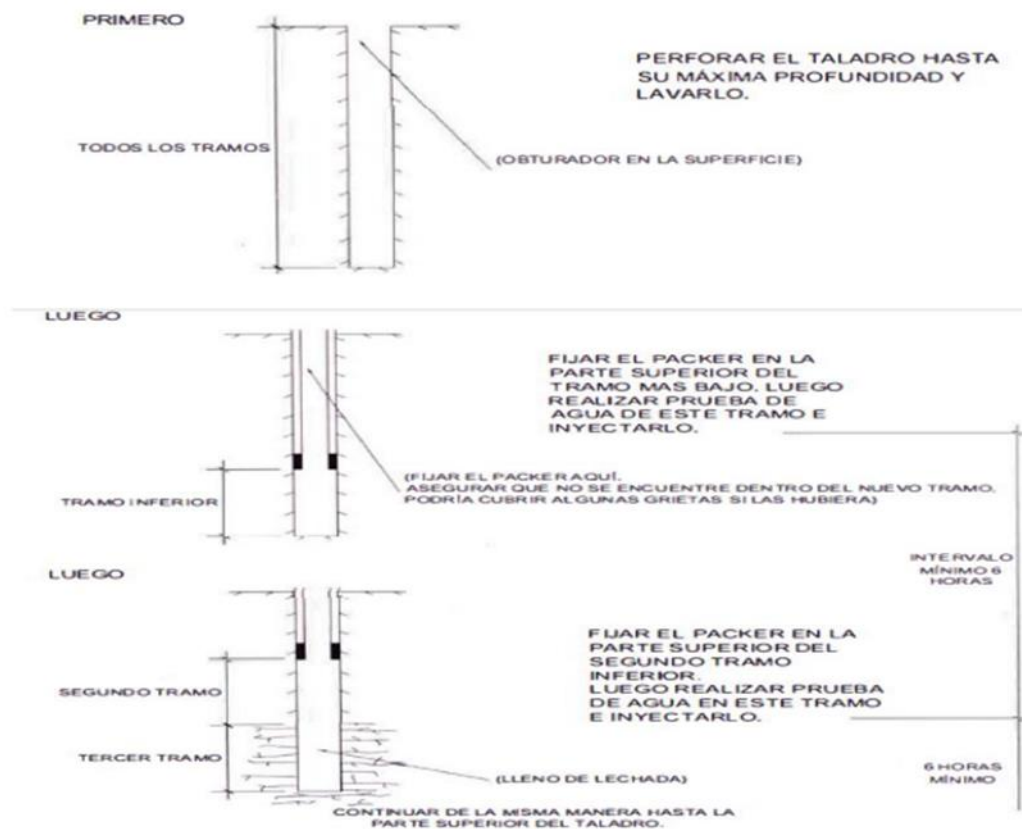


Figura 37 Inyección ascendente.

Nota. Tomado de *Impermeabilización mediante inyecciones de cemento en macizo rocoso para evitar la surgencia de agua en explotación subterránea Cajamarca*, por C. Herrera, 2019, <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/21786/Herrera%20de%20la%20Cruz%20Carmen%20Esther.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

2.5.2 Tipos de inyecciones

Según el autor Pacheco (2022), el propósito del proceso de inyección de lechada es fortificar o impermeabilizar las fisuras y los macizos porosos, a fin de aumentar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso. A partir de ello, se describen tres tipos de inyecciones para llevar a cabo el revestimiento:

- Inyección por reemplazo o *jet grouting*: este tipo de inyección se emplea en aplicaciones geotécnicas para optimizar las condiciones del suelo en general, así como para estabilizar laderas y reforzar pilotes, muros de contención y cimentaciones.

- Inyección por consolidación: consiste en introducir lechadas de baja movilidad con alta fricción interna en el suelo para mejorar su densidad y resistencia. Al elegir adecuadamente los materiales y parámetros, la lechada forma una masa uniforme alrededor del área de inyección. Cerca de la superficie, esta lechada puede provocar el levantamiento del terreno y las estructuras asentadas sobre él.
- Inyección por impregnación: consiste en inyectar lechada en el terreno mediante su fracturación, al aplicar una presión superior a su resistencia a la tracción y mayor a la presión de confinamiento. Esta técnica puede utilizarse en una amplia variedad de suelos y rocas blandas, desde suelos granulares gruesos y arcillas de alta plasticidad hasta rocas ígneas muy meteorizadas y margas arcillosas. El procedimiento implica inyectar lechada en las fisuras naturales del suelo o crear una serie de fracturas hidráulicas que luego se rellenan con mortero, a fin de rodear los fragmentos o clastos. La fracturación hidráulica genera un efecto de sobreconsolidación en el terreno, principalmente al reducir su índice de poros.

Por su parte, Herrera (2019) señaló que los tipos de inyecciones dependen del trabajo. Estos son los que se muestran en la Figura 38.

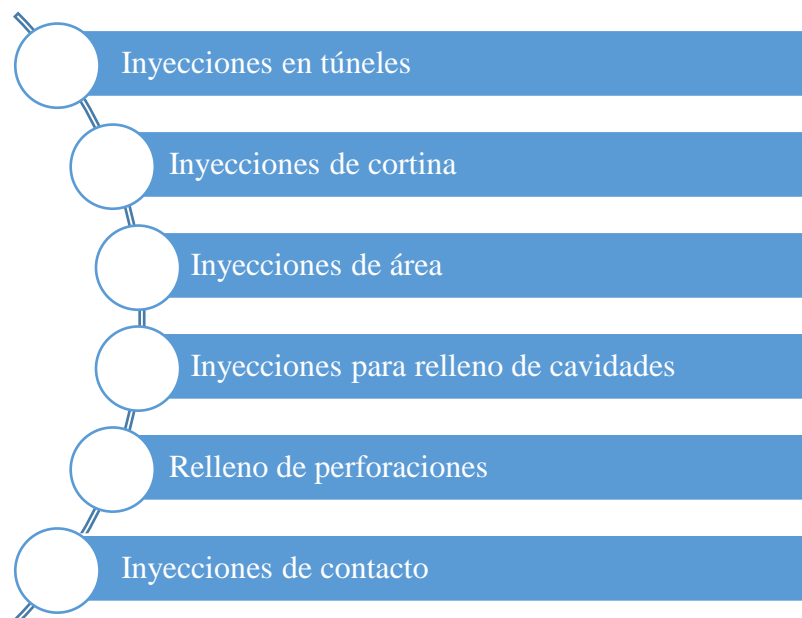


Figura 38 Tratamiento de inyecciones según el trabajo.

Nota. Tomado de *Impermeabilización mediante inyecciones de cemento en macizo rocoso para evitar la surgencia de agua en explotación subterránea Cajamarca*, por C. Herrera, 2019, <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/21786/Herrera%20de%20la%20Cruz%20Carmen%20Esther.PDF?sequence=1&isAllowed=y>

2.6 Proceso constructivo

El proceso constructivo puede variar, pues depende del método implementado al momento de la construcción. De acuerdo con Milián (2005), el proceso constructivo de columnas de grava conlleva la consideración de los siguientes pasos y consideraciones:

- a) La columna de grava se lleva hasta la profundidad requerida mediante la utilización de la unidad vibratoria. Después de excavar hasta la profundidad señalada por medio del método húmedo, se procede a limpiar, levantando y dejando caer, el instrumento de exploración. Generalmente, estos pasos se repiten 2 o 3 veces.
- b) Después de la limpieza, se deja el instrumento de exploración en el agujero, pero los chorros de agua siguen funcionando. Esto facilita la limpieza de la grava y una colocación rápida. En caso de que la excavación presente una estabilidad cuestionada, siempre se debe dejar el instrumento de exploración en el interior de la excavación con los chorros de agua funcionales.
- c) La graduación de la grava es variable según la disponibilidad y las condiciones del subsuelo. Generalmente se necesita un agregado angular, sin graduación, con una variación de 12 a 75 mm de largo. De preferencia, se debe usar grava triturada; no obstante, también puede utilizarse la piedra en su estado natural. Para el método húmedo no hay problema si la grava contiene un poco de elementos finos, porque esta se desecha por medio del agua. En cambio, en el método seco se puede utilizar una piedra de 100 mm para conseguir un aseguramiento que llegue al fondo de la excavación.
- d) La construcción de columnas de grava se debe realizar en capas de 0.6 a 1.2 m. La cantidad propicia de piedra debe ubicarse en el agujero, y esta debe llevarse hasta el fondo por medio de la compactación continua que asegura la dosificación. A medida que se da la densificación de la grava, la cantidad de

energía ejecutada por el vibrador incrementa. Por tanto, el gasto de energía garantiza una adecuada densificación de la grava.

- e) Por el desplazamiento lateral de la grava durante la vibración, el diámetro posterior a la construcción es mayor que el diámetro inicial excavado. Los diámetros típicos de excavación tienen una variación de entre 0.8 y 1.2 m, según el suelo, la resistencia no drenada al corte, el tamaño de la piedra, las características del vibrador y el método de construcción. En suma, el diámetro final de la columna se estima mediante una muestra de piedra y determina una densidad compactada.
- f) El procedimiento de construcción se repite en las columnas subsecuentes. Debe promulgarse un espaciamiento entre las columnas de entre 1.8 y 2.7 m, y no menor a 1.5 m. De esa forma, cuando el desarrollo del espaciamiento entre columnas decrece, la cantidad de suelo reemplazado crece. Para las columnas espaciadas cerca, las fuerzas laterales residuales de las columnas construidas generalmente dificultan la estabilidad de la perforación contigua; no obstante, luego de construidas las columnas, estos esfuerzos residuales asisten de soporte lateral a la columna adyacente.

La referencia sobre el proceso constructivo permite estimar consideraciones de importancia para garantizar una buena construcción, conforme a los métodos utilizados por los responsables. Adicionalmente, se señalan elementos que pueden perjudicar, como el espaciamiento. Para Castellanos y Rodríguez (2022), el proceso constructivo cuenta con las siguientes etapas: perforación, fabricación y colocación de la armadura; y producción e inyección de la lechada o mortero. Ambos aportes fundamentan el desarrollo de la parte constructiva en el contexto del presente estudio.

2.7 Reinyección

Otro de los elementos a referenciar dentro del presente marco es la reinyección. De acuerdo con Ramírez y Holguín (2023), se tiene la siguiente definición:

La reinyección de cortes consiste en el bombeo presurizado de los sólidos en forma de lechada a través de un pozo disposición. El proceso es altamente reconocido por ser amigable con el ambiente, y ser económico al manejar ripios de perforación de pozos costa afuera. (p. 25)

La reinyección de cortes consiste en la mezcla de cortes que se procesan por la trituración u otros procedimientos de mecánica, los cuales se ejecutan con agua de mar para formar una lechada viscosa y estable. De ese modo, tales cortes se bombean hacia el pozo o mediante un espacio anular entre las sartas de revestimientos de un pozo activo y se inyectan bajo presión en las formaciones (Silva y Díaz, 2023). Aunado a esto, dentro de los procesos de reinyección se ejecutan fracturamientos hidráulicos, por lo que se consideran parámetros para optimizar estas etapas, como los siguientes:

- Presión.
- Tasa de circulación de la lechada.
- Propiedades petrofísicas de la lechada.
- Estado mecánico del pozo.
- Completación del pozo.
- Permeabilidad.
- Daño (Ramírez y Holguín, 2023).

En esencia, se visualiza la etapa de reinyección como un proceso que se basa en la trituración o el fracturamiento, y esta se describe como un procedimiento amigable con el medioambiente. Para desarrollar este tipo de acciones, se debe seguir una serie de pasos. Delgado y Ruiz (2022) mencionaron los que se listan a continuación:

- Transportar el material o los residuos del proceso hacia la zona de procesamiento. Entre estos elementos se incluyen los cortes y fluidos de perforación, líquidos de operaciones, lodo, desecho de *dewatering*, etc.
- En el sector de procesamiento los cortes se recirculan, con lo que se consigue el ajuste del tamaño de las partículas a la medida adecuada para la reinyección. Adicionalmente, se colocan agua y otras sustancias, con el fin de obtener la lechada con la densidad y la viscosidad apropiadas para el tratamiento.
- El fluido procesado se envía hacia la zaranda para clasificarse, por lo que las partículas que aún se pueden considerar grandes para la etapa de reinyección se deben recircular de nuevo. En cambio, las demás se envían al sistema de retención para homogeneizarse.

Ante lo señalado, los autores resumieron la fase de reinyección en tres pasos que abarcan básicamente el traslado de recursos, el procesamiento y el ajuste para la

reinyección, y los procesos de zaranda. Finalmente, Chipantaxi (2021) presentó otro flujograma de reinyección a considerar (Figura 39).

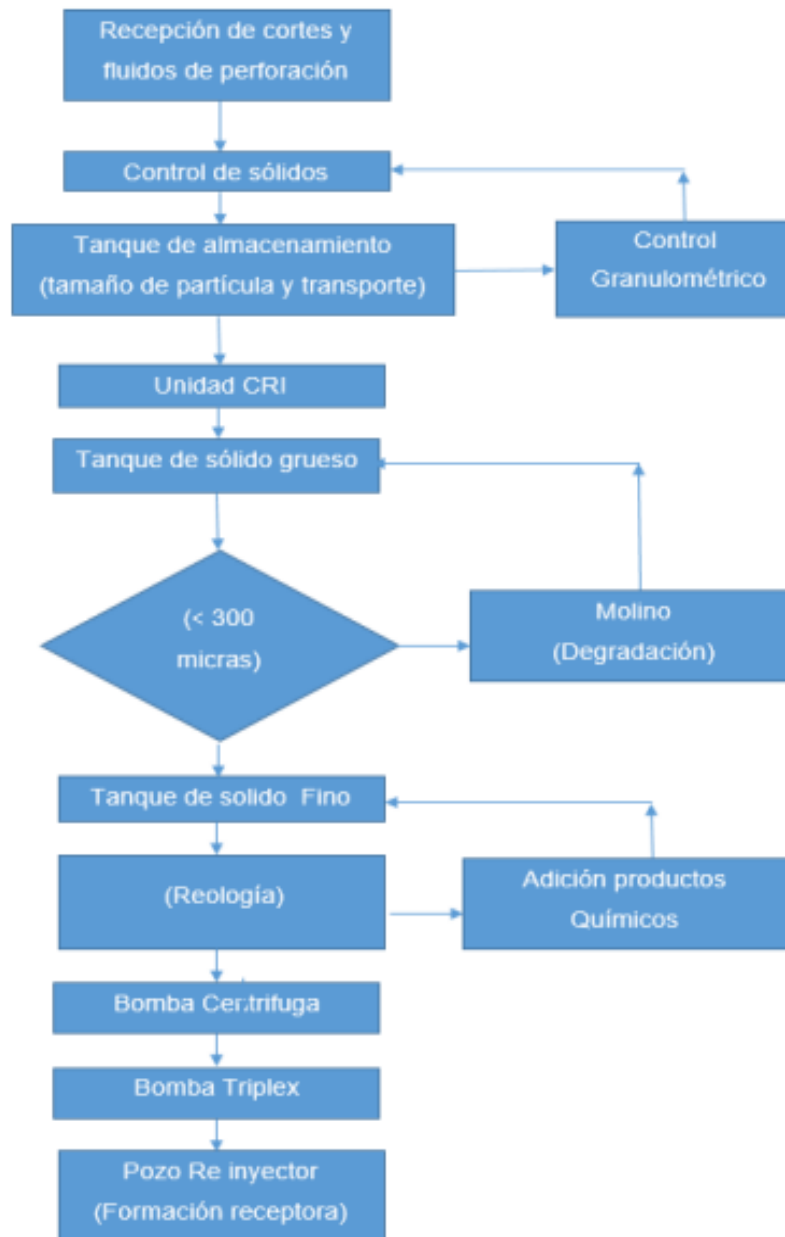


Figura 39 Flujo de procesos de reinyección.

Nota. Tomado de *Estudio de factibilidad técnica para la reinyección de cortes de perforación en el bloque 43 ITT, Campo Tambococha*, por V. Chipantaxi, 2021, <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23419/1/CD%2012847.pdf>

En este caso, la Figura z39 describe el proceso desde una perspectiva más operativa, donde se inicia con la recepción de cortes y fluidos. También se observan etapas de decisión, donde se considera cómo actuar ante determinados resultados en los

procesos. Por último, se culmina con la formación receptora. Ambas descripciones son fundamentos que pueden servir para la estipulación de esta clase de acciones cuando se requiera reinyectar en procesos de construcción.

2.8 Ecosonografía

Las técnicas de ultrasonidos se desarrollaron por primera vez en Canadá, de acuerdo con el trabajo de Leslie y Cheesman entre los años 1945 y 1949, el cual se utilizó en los años 60 por Jones y Gatfield de Gran Bretaña para diagnosticar el estado del concreto mediante la implementación de cortinas de presas. De esa forma, desde el año 1967, se han estipulado reglas para la implementación de los pulsos ultrasónicos, con lo que se han establecido recomendaciones para la velocidad de pulsos para el concreto (Vidaud y Vidaud, 2016).

En consecuencia, estos recursos se adaptaron para generar una visión mayor al propósito inicial y se incluyeron dentro de las etapas de la ecosonografía para los procesos de construcción, por la utilidad que tenían para profundizar en las prioridades. Con esto se demostró la valía de dichos recursos para ejecutar fases de construcción.

Ahora bien, estos recursos se pueden definir como oscilaciones mecánicas que generan frecuencias por encima del nivel audible. Al respecto, se sabe que el límite entre el sonido audible y el ultrasónico oscila entre los 20kHz, y que las frecuencias implementadas en materiales como el hormigón son de hasta 54 kHz, y de 15 Mhz para algunos metales. Estos elementos son funcionales porque se transmiten bien en líquidos y sólidos, por lo que, cuando la onda ultrasónica se mueve en el interior de un material, se mueve siempre dentro de dicho rango, debido a la interfase de la pieza y el aire que la rodea (Huete et al., 1993).

Las ondas ultrasónicas pueden propagarse a través de los materiales cementicios o dentro de otros tipos de materiales ya sean sólidas, líquidas y gaseosas. Las ondas son propagadas de distintas maneras, correspondiendo cada una de ellas al movimiento particular de los elementos y del medio donde se encuentre. (Cedeño, 2015, p. 14)

Estos métodos de ultrasonidos funcionan a través de la transmisión de ondas, cuyos intervalos de frecuencia permiten aplicarlos para detectar defectos como poros, fisuras u otros aspectos. Además, este proceso sirve para el reconocimiento de propiedades

básicas de los elementos líquidos y sólidos, como su composición y estructura. Entre los tipos de ondas que pueden generarse están las siguientes.

Tabla 4
Métodos de ultrasonidos

| Tipos de ultrasonidos | Descripción | Ecuación |
|--------------------------------------|---|---|
| Ondas longitudinales o de compresión | En ondas longitudinales, las partículas alcanzan mayor velocidad de propagación y las inclinaciones son paralelas a la dirección de propagación. Estas son las más utilizadas en el método de ultrasonido por su fácil generación y su capacidad de detección en los diversos medios. Asimismo, la velocidad de onda longitudinal (VL) se expresa en función del módulo de elasticidad (E), la densidad (ρ) y el coeficiente de Poisson (ν). | $V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$ |
| Ondas transversales o de cizalladura | Exponen movimientos de partículas perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Únicamente se propagan en medios sólidos, pues en componentes líquidos y gaseosos no ofrecen resistencia a los esfuerzos de corte. | $V_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-2\nu}}$ |
| Ondas superficiales o de Rayleigh | Se diferencian por partículas que poseen una combinación de movimientos longitudinales y transversales, con lo que se ejecuta una elipse donde el mayor eje es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Estas ondas son de utilidad para la implementación del método de ultrasonido, por su extraordinaria sensibilidad a los defectos superficiales de la pieza analizada, con | $V_s = k V_t$ |

| | | |
|--|--|--|
| | capacidad de reproducir dichas curvas superficiales. Finalmente, estas se propagan en la superficie de los sólidos de espesores relativamente gruesos. | |
|--|--|--|

Nota. Elaboración propia, adaptado de *Estudio de la evolución de las propiedades mecánicas de pastas y morteros proyectado empleando ultrasonidos*, por S. Cedeño, 2015,

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78866/TESIS_EdFinalEntrega.pdf

Las características expuestas dentro de la Tabla 4 permiten tener una noción de los métodos a implementar en las fases de ultrasonidos. Tales métodos podrían ser de utilidad en las labores de construcción, para aplicarlos en elementos de diferentes características, como en sólidos y líquidos.

Capítulo III. Propuesta de elemento constructivo para cimentación profunda

3.1 Pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia a partir de columnas de gravas excavadas

Esta tesis propone la implementación de un novedoso elemento estructural para cimentaciones profundas en suelos blandos de la ciudad de Guayaquil, junto con una metodología constructiva económicamente viable. Una característica distintiva de esta propuesta es su capacidad para aplicarse en suelos extremadamente blandos, donde la maquinaria de construcción convencional presenta dificultades de acceso. El elemento estructural que se desarrolla es un pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia, derivado de columnas de grava, que combina dos enfoques actuales: la inyección y la reinyección de pilotes. Además, este nuevo diseño incluye columnas de grava inyectadas.

La propuesta busca aprovechar las ventajas de ambos métodos mientras se mantiene como una opción técnica y económicamente viable. Para ello, se enfoca en tres aspectos clave: un alto rendimiento constructivo, la reducción del uso de lechada, y la prevención de la mezcla con el nivel freático. La reinyección permite que el pilote funcione tanto por punta como por fuste, y el alto rendimiento constructivo se logra mediante una metodología que facilita la introducción de una camisa metálica sin necesidad de perforación del terreno, lo que permite una construcción inmediata del elemento y la reutilización de la misma camisa en otros pilotes.

En cuanto al geotextil, este juega un papel crucial al permitir la correcta colocación del armado estructural del pilote, la tubería de inyección para la reinyección posterior y la grava excavada. Con ello, se pueden evitar el desplazamiento de la grava, el escape de la lechada hacia el terreno, y la entrada de agua freática al pilote. Asimismo, la reinyección posterior permite que el pilote, que inicialmente trabaja por fuste en suelos blandos, también funcione por punta al reforzar el estrato en la base del pilote.

Este nuevo elemento estructural no solo supera las limitaciones asociadas con suelos extremadamente blandos, sino que también optimiza el rendimiento constructivo, al proponer una metodología eficiente para cimentaciones profundas en los suelos blandos de la ciudad de Guayaquil.

3.1.1 Proceso constructivo

A continuación, se detalla el proceso constructivo del pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia a partir de columnas de grava excavadas.

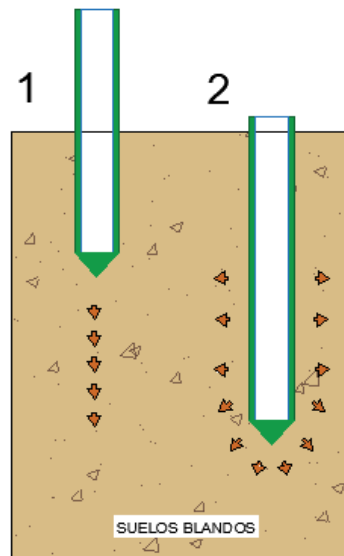


Figura 40 Proceso constructivo de la metodología a proponer, etapas 1 y 2.

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 40 se muestran las dos primeras etapas del proceso constructivo de la metodología propuesta. La primera etapa es la introducción de la camisa metálica recuperable, que puede armarse por tramos cada 3 m, lo que facilitaría la producción de pilotes. La segunda etapa se da cuando la camisa metálica comienza a desplazar los estratos blandos al momento de ingresar, con lo que se puede llegar a la profundidad requerida; ello, mediante la presión hidráulica.

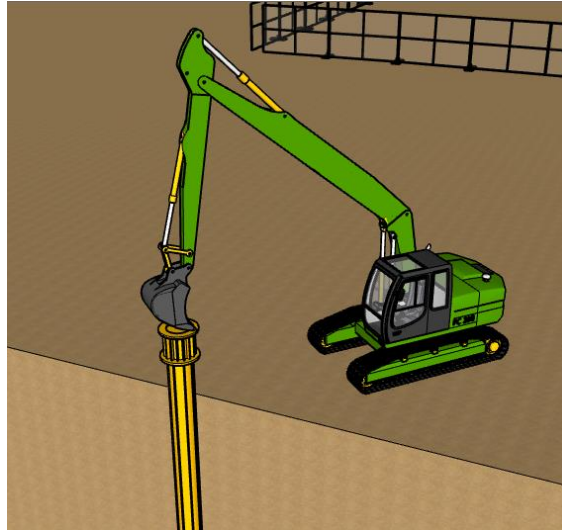


Figura 41 Hincado de camisa metálica recuperable mediante presión hidráulica.

Nota. Elaboración propia.

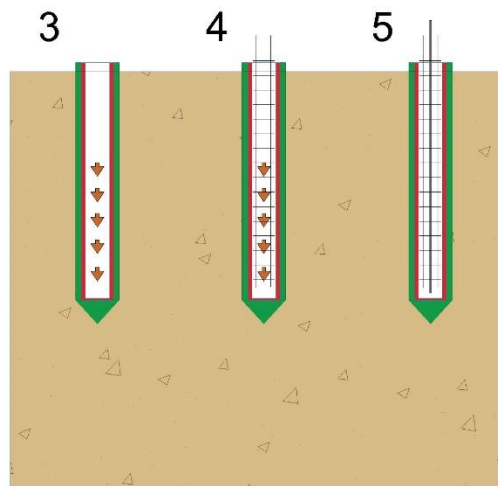


Figura 42 Proceso constructivo de la metodología a proponer, etapas 3, 4 y 5.

Nota. Elaboración propia.

Una vez puesta la camisa metálica a la profundidad requerida, se procede con la tercera etapa (Figura 42), que consiste en poner el geotextil y envolver la parte interior de dicha camisa, con lo que se obtiene una forma tubular. Igualmente, la cuarta etapa se basa en el armado estructural del pilote; y la quinta etapa, en el ingreso de la tubería para realizar la inyección del pilote.

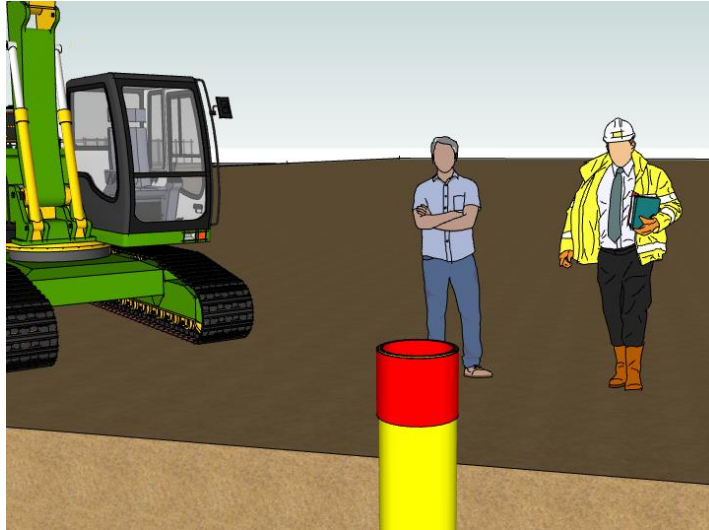


Figura 43 *Geotextil colocado dentro de la camisa metálica recuperable.*

Nota. Elaboración propia.

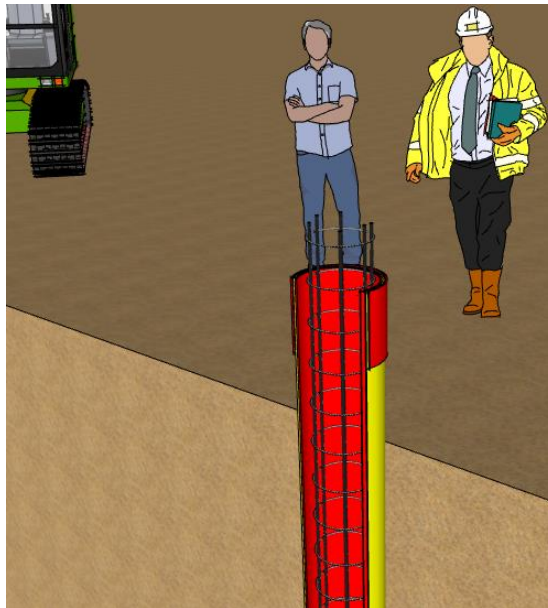


Figura 44 *Armado estructural dentro de la camisa metálica.*

Nota. Elaboración propia.

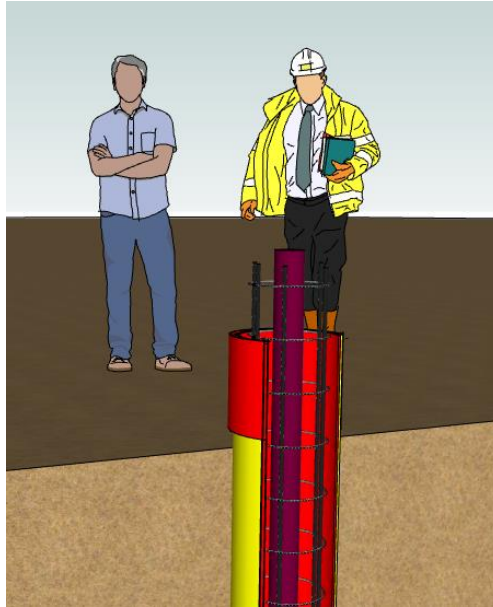


Figura 45 Colocación de tubo de inyección de lechada de cemento.

Nota. Elaboración propia.

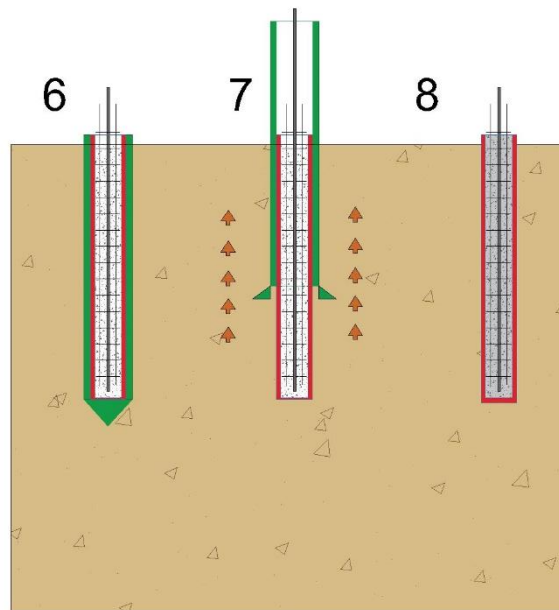


Figura 46 Proceso constructivo de la metodología a proponer, etapas 6, 7 y 8.

Nota. Elaboración propia.

La sexta etapa se ilustra en la Figura 46, y esta consiste en vaciar gravas dentro del armado del pilote. De igual manera, la séptima etapa se da cuando, una vez vaciada la grava, se procede a realizar el retiro de la camisa metálica; para este punto, se puede realizar el siguiente hincado, a fin de hacer otro pilote. Finalmente, la octava etapa es la inyección de cemento por la tubería puesta en la quinta etapa.

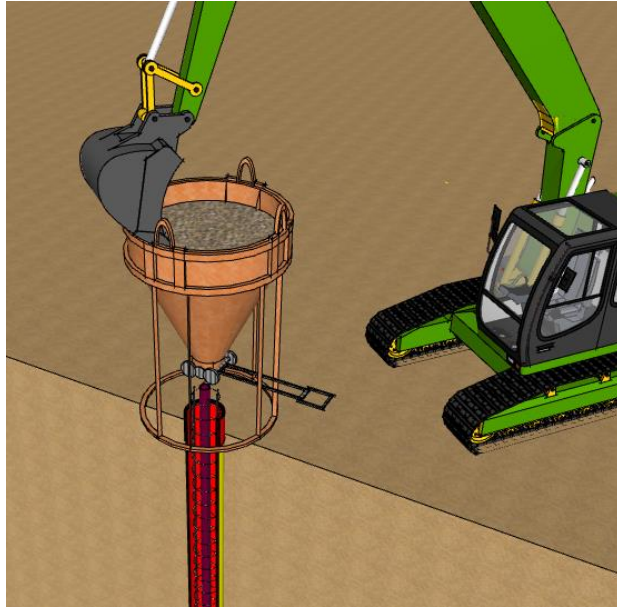


Figura 47 *Vaciado de gravas mediante embudo en armado del pilote.*

Nota. Elaboración propia.

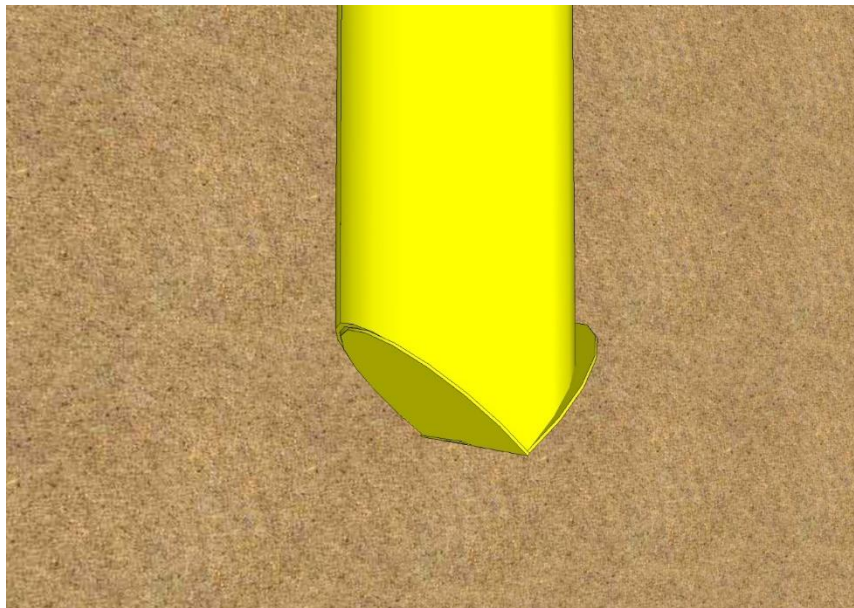


Figura 48 *Punta cerrada de la camisa metálica recuperable.*

Nota. Elaboración propia.

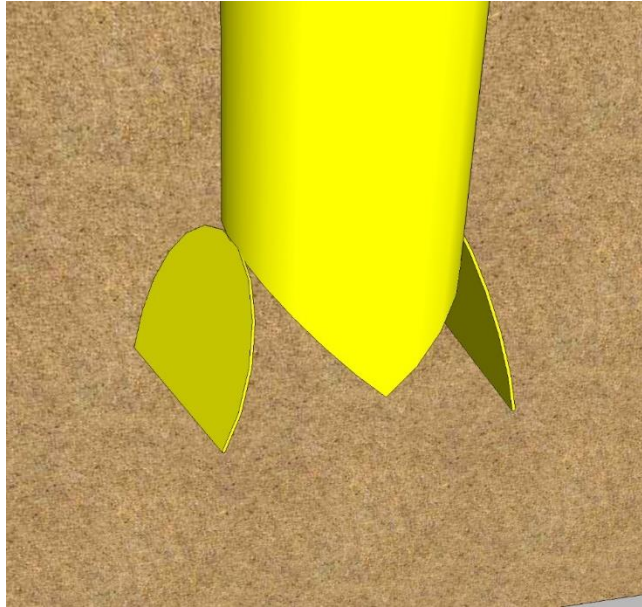


Figura 49 Punta abierta de la camisa metálica recuperable.

Nota. Elaboración propia.

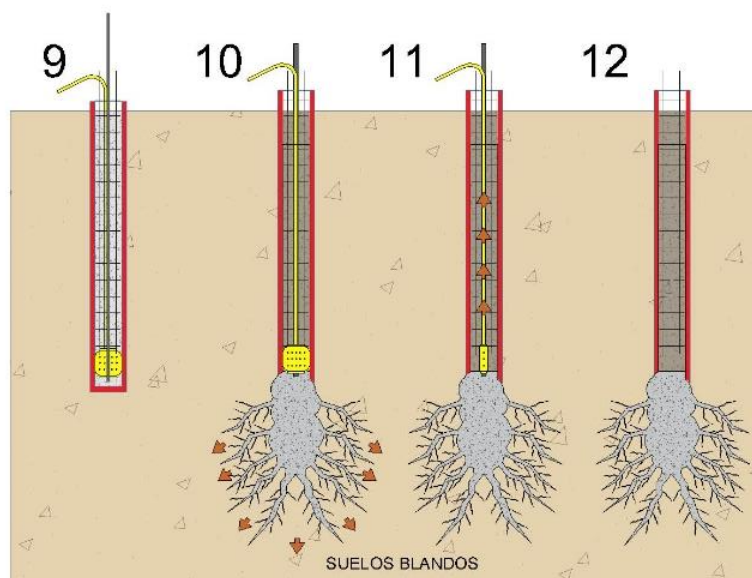


Figura 50 Proceso constructivo de la metodología a proponer.

Nota. Elaboración propia.

Después de realizar la inyección de la lechada, ya se tiene el pilote construido. La novena etapa, que se muestra en la Figura 50, abarca la perforación del tubo donde se realiza la inyección de la lechada de cemento. Posteriormente, se ingresa un obturador hasta la punta del pilote. Luego, en la décima etapa, el obturador se infla en la base del pilote, con lo que se realiza la reinyección, donde la lechada ejerce una presión en el

estrato blando y crea un bulbo con un sistema radicular, el cual mejora el estrato donde se encuentra la punta del pilote. Adicionalmente, se tiene la decimoprimera etapa, donde, una vez construido el bulbo con el sistema radicular, se retira el obturador; y en la decimosegunda etapa se ve el pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia.

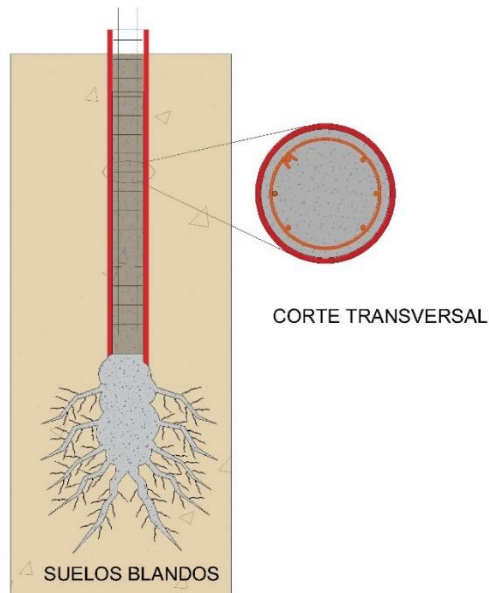


Figura 51 *Detalle de la sección transversal del pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia construida.*

Nota. Elaboración propia.

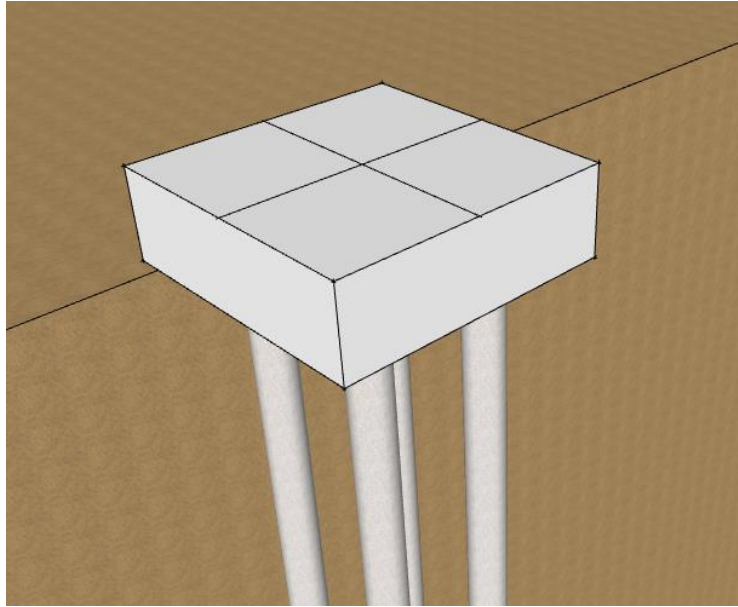


Figura 52 *Grupos de pilotes colocados debajo de la zapata.*

Nota. Elaboración propia.

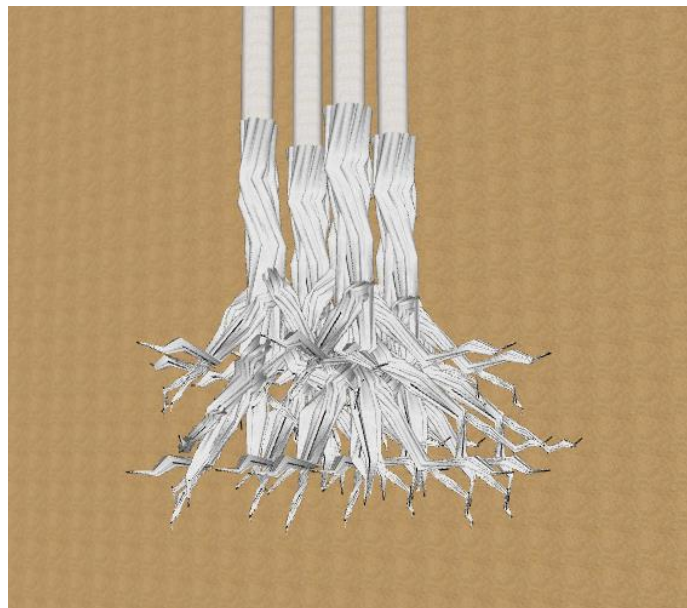


Figura 53 *Sistema radicular de un grupo de pilotes.*

Nota. Elaboración propia.

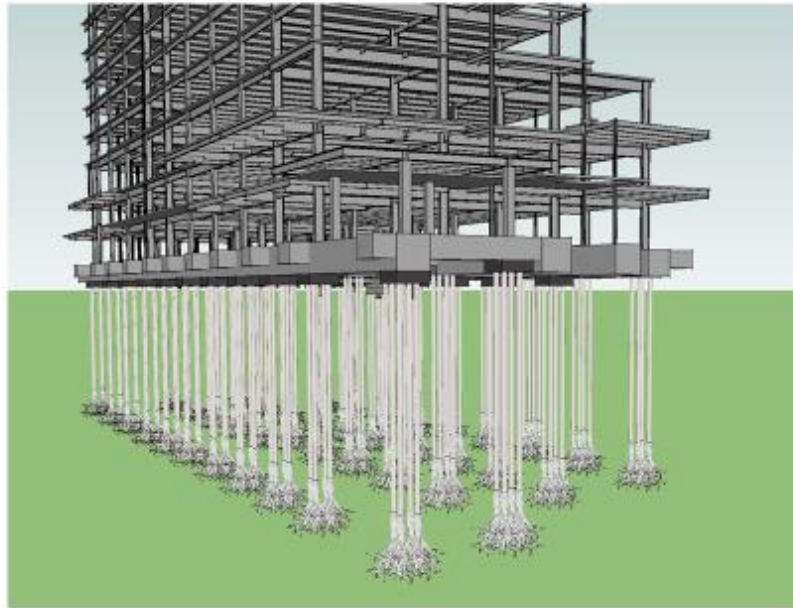


Figura 54 *Cimentación profunda de una edificación con grupos de pilotes trabajando con el sistema radicular en la punta.*

Nota. Elaboración propia.

3.2 Ensayos de laboratorio de la lechada cementicia

3.2.1 Diseño de lechada cementicia

En el diseño de la lechada cementicia se consideró esencial garantizar que la fluidez de la lechada de inyección y reinyección fuera adecuada para permitir una penetración efectiva entre las columnas de gravas excavadas del pilote, con lo que se reduciría al mínimo la formación de vacíos. Paralelamente, se buscó mantener una resistencia mecánica suficiente, a fin de evitar la disminución excesiva en ella. Con este objetivo, se priorizó la selección de la relación agua/cemento más baja, para cumplir óptimamente con estos requisitos.

Por otro lado, las pruebas de laboratorio indicaron que una relación agua/cemento de 0.55 o superior proporcionaba la consistencia necesaria para una adecuada penetración entre las columnas. Sin embargo, al emplear un aditivo plastificante, se pudo reducir esta relación hasta 0.36 sin comprometer la penetración. Para la formulación experimental de la lechada cementicia, se utilizó la cantidad de aditivo recomendada

por el fabricante en combinación con la relación agua/cemento previamente establecida.

Tabla 5

Diseño de lechada cementicia

| Diseño de lechada de inyección y reinyección para pilote | |
|---|------------------|
| Materiales | Peso (kg) |
| Cemento | 26 342.80 |
| Agua | 9483.40 |
| Aditivo | 351.20 |
| Agua/cemento | 0.36 |

Nota. Elaboración propia.

Tabla 6

Diseño de lechada cementicia por metro cúbico

| Diseño de lechada de inyección y reinyección para pilote por metro cúbico | |
|--|------------------|
| Materiales | Peso (kg) |
| Cemento | 1317.14 |
| Agua | 474.17 |
| Aditivo | 17.56 |
| Agua/cemento | 0.36 |

Nota. Elaboración propia.

3.2.2 Elaboración de lechada cementicia y llenado en moldes cilíndricos

Para evaluar la resistencia a la compresión simple de la lechada diseñada, se prepararon múltiples probetas que posteriormente se ensayaron en el laboratorio. Se generaron tres muestras individuales de lechada de cemento, denominadas M1, M2 y M3. Cada una de estas se utilizó para fabricar tres moldes distintos, que se sometieron a ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días, respectivamente. Este enfoque se adoptó con el objetivo de obtener resultados más representativos y precisos en la evaluación de la resistencia a compresión de la lechada.



Figura 55 *Cuantificación de cemento a utilizar.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 56 *Cuantificación del agua.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 57 *Cuantificación y mezclado de aditivo plastificante.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 58 *Mezclado de la lechada cementicia.*

Nota. Elaboración propia.

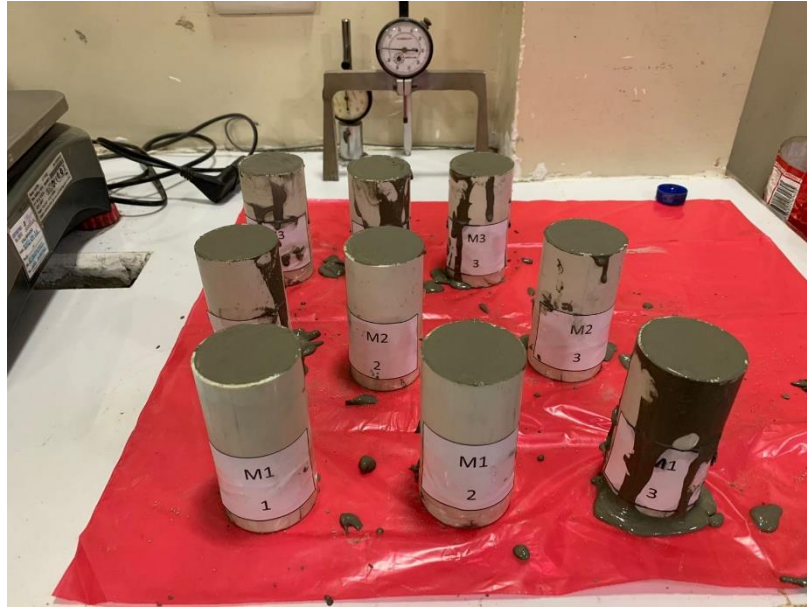


Figura 59 *Llenado de moldes con lechada cementicia.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 60 *Cilindros de lechada cementicia desmoldadas.*

Nota. Elaboración propia.

3.2.3 *Medición y rotura de cilindros*

Antes de llevar a cabo los ensayos de compresión simple en las probetas, se procedió a medir y pesar cada una de las muestras.



Figura 61 Pesaje de cilindro compuesto de lechada cementicia.

Nota. Elaboración propia.



Figura 62 Medición de cilindros de lechada cementicia.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7

Peso y medición de cilindros de lechada, muestras M1, M2 y M3 a los 7 días

| Muestra de lechada cementicia - 7 días | | | | |
|--|-----------|---------------|-------------|-------------------------|
| Muestra | Peso (kg) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm ²) |

| | | | | |
|-------------|-------|------|-------|-------|
| M1-1 | 0.334 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |
| M2-1 | 0.328 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |
| M3-1 | 0.331 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8

Peso y medición de cilindros de lechada, muestras M1, M2 y M3 a los 14 días

| Muestra de lechada cementicia - 14 días | | | | |
|--|------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|
| Muestra | Peso (kg) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm²) |
| M1-2 | 0.326 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |
| M2-2 | 0.333 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |
| M3-2 | 0.329 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |

Nota. Elaboración propia.

Tabla 9

Peso y medición de cilindros de lechada, muestras M1, M2 y M3 a los 28 días

| Muestra de lechada cementicia - 28 días | | | | |
|--|------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|
| Muestra | Peso (kg) | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm²) |
| M1-3 | 0.332 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |
| M2-3 | 0.330 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |
| M3-3 | 0.335 | 4.66 | 10.00 | 17.06 |

Nota. Elaboración propia.



Figura 63 *Cilindro con lechada cementicia antes de la rotura.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 64 *Cilindro con lechada cementicia después de la rotura.*

Nota. Elaboración propia.

3.2.4 *Resultados de los ensayos de laboratorio*

Tabla 10

Evolución de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia (M1, M2 y M3)

| Resistencia a la compresión simple | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Tiempo (días) | Muestra 1 (kg/cm ²) | Muestra 2 (kg/cm ²) | Muestra 3 (kg/cm ²) |
| 7 | 281.24 | 286.81 | 288.45 |
| 14 | 354.75 | 358.32 | 364.54 |
| 28 | 409.55 | 412.49 | 414.60 |

Nota. Elaboración propia.

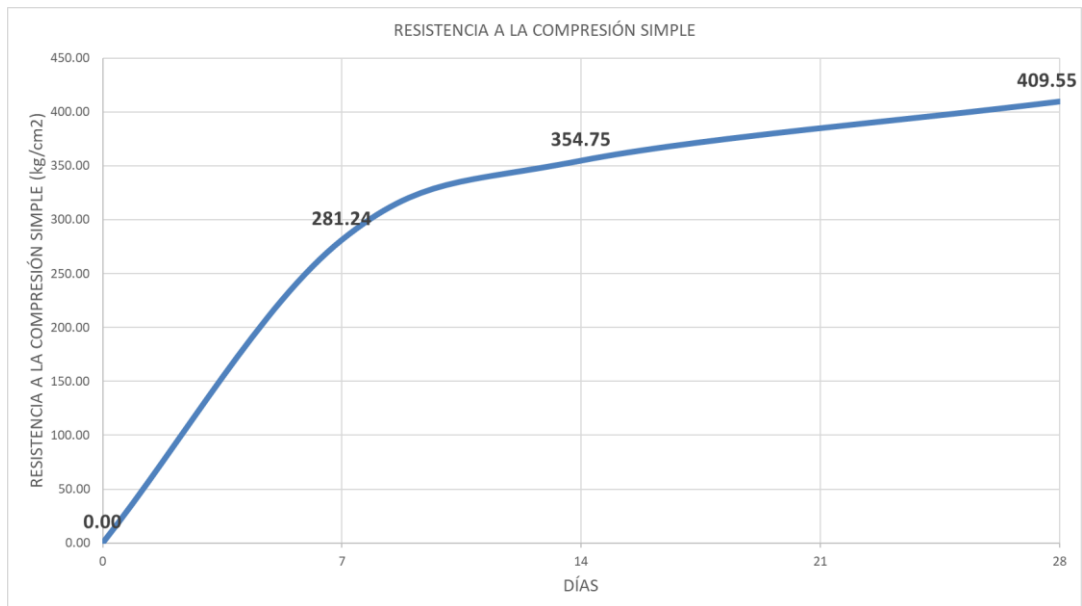


Figura 65 *Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra M1.*

Nota. Elaboración propia.

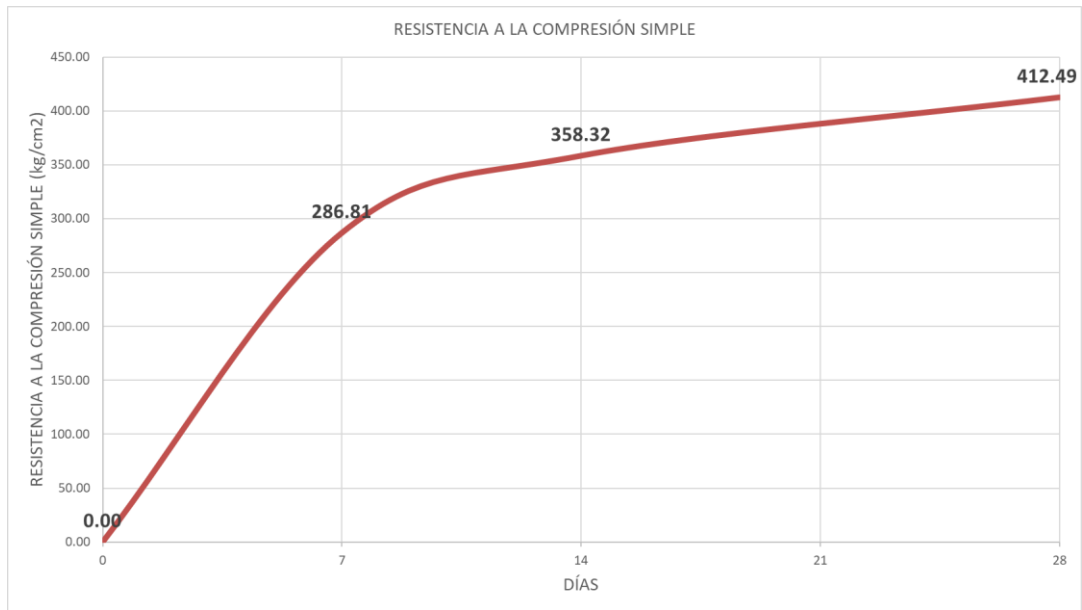


Figura 66 Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra M2.

Nota. Elaboración propia.

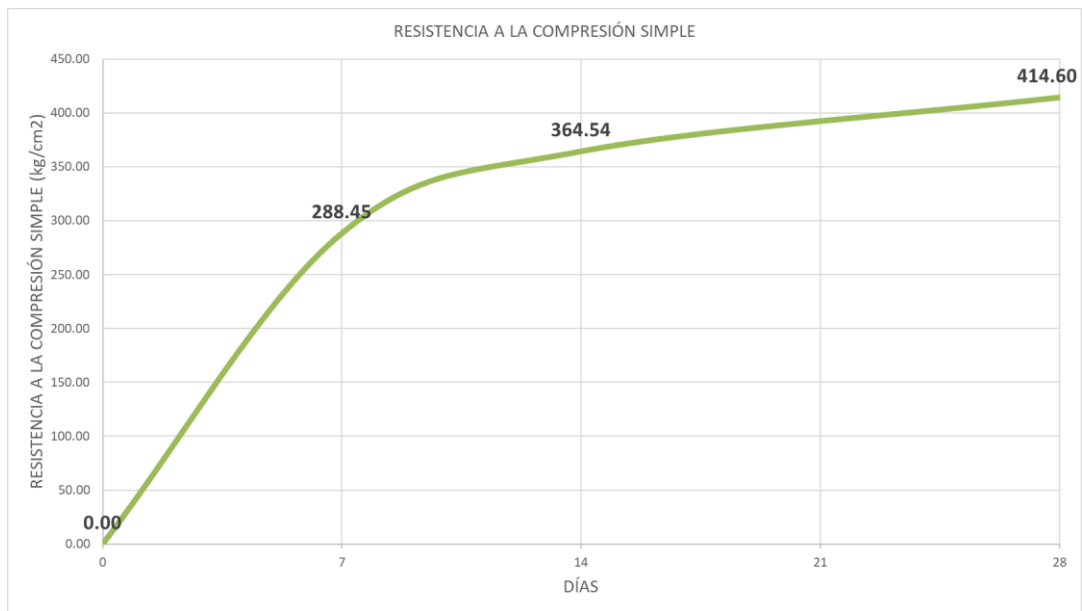


Figura 67 Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra M3.

Nota. Elaboración propia.

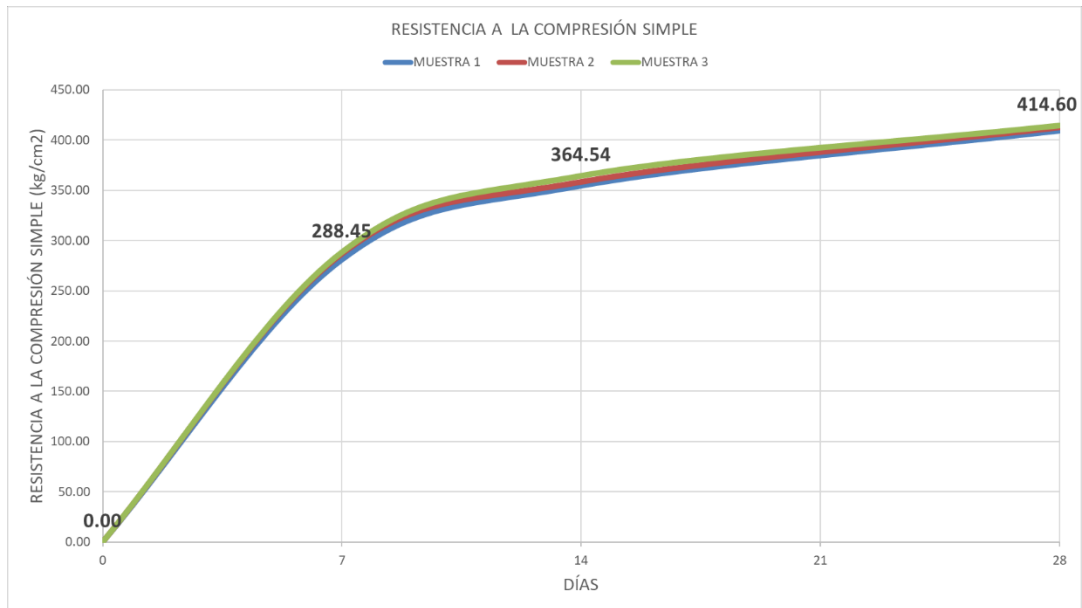


Figura 68 Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestras M1, M2 y M3.

Nota. Elaboración propia.

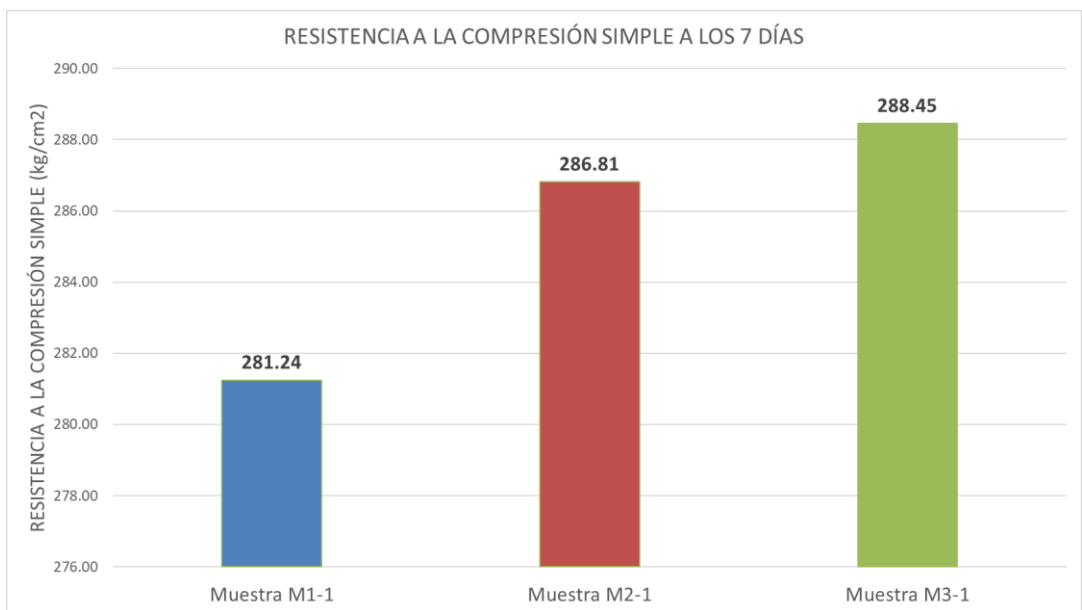


Figura 69 Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia M1, M2 y M3 a los 7 días.

Nota. Elaboración propia.

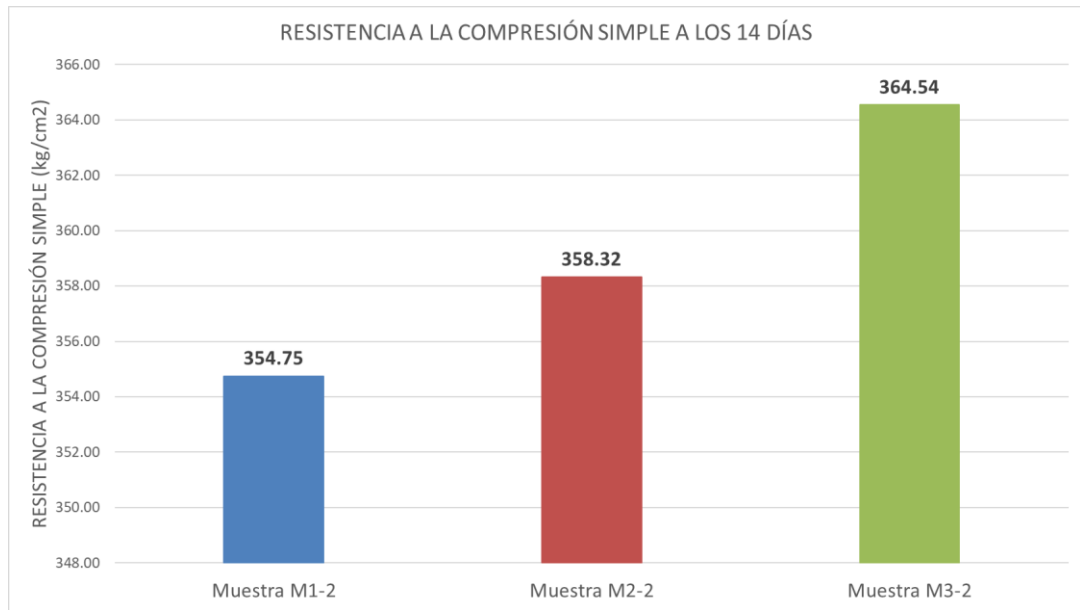


Figura 70 Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia M1, M2 y M3 a los 14 días.

Nota. Elaboración propia.

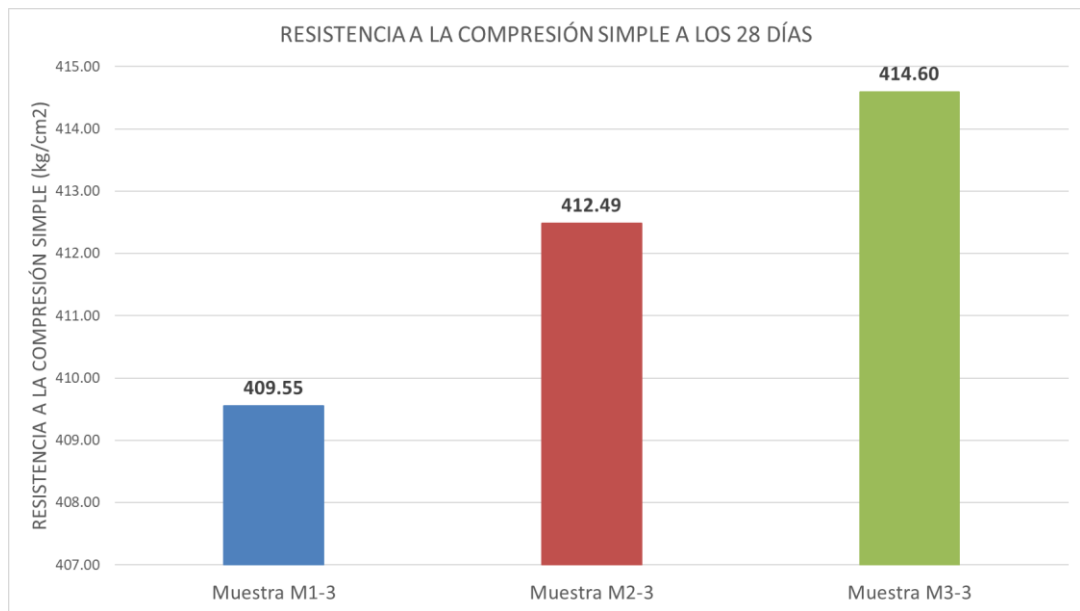


Figura 71 Gráfico comparativo de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada cementicia M1, M2 y M3 a los 28 días.

Nota. Elaboración propia.

3.3 Ensayos de laboratorio del material piedra-cemento

En la preparación de los moldes con material piedra-cemento, se utilizó la lechada previamente diseñada. Al igual que en el caso de la lechada, se llevaron a cabo pruebas para definir una granulometría de la piedra, a fin de asegurar una penetración satisfactoria de la lechada. Además, se fabricaron tres moldes de este material, los cuales se sometieron a ensayos de compresión simple a los 7, 14 y 28 días.

3.3.1 *Granulometría de la piedra*

Para seleccionar una granulometría adecuada de la piedra, se demostró la necesidad de asegurar una penetración eficiente de la lechada. Para lograrlo, se optó por un tamaño de agregado relativamente mediana, lo cual facilitó la penetración. Sin embargo, se tuvo en cuenta que un mayor tamaño de agregado puede aumentar la cantidad de vacíos que la lechada debe llenar, lo que podría ser contraproducente. De esa manera, se buscó un equilibrio al seleccionar un tamaño de agregado que cumpliera con ambas condiciones de manera óptima.

Por otro lado, se halló que el agregado de tamaño nominal de 1/2" permite una fácil penetración de la lechada; en cambio, los agregados de tamaño considerablemente menor mostraron cierta resistencia a la penetración de la lechada. Por esta razón, se decidió utilizar la piedra de 3/4".

Tabla 11

Granulometría de material grueso para moldes

| Tamices de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) | Abertura (mm) | Peso retenido | Retenido parcial | Retenido acumulado | Porcentaje que pasa |
|--|---------------|---------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 3/4" | 19.000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 1/2" | 12.700 | 514.0 | 8.3 | 8.3 | 91.7 |
| 3/8" | 9.520 | 1258.0 | 20.3 | 28.6 | 71.4 |
| N° 4 | 4.750 | 3267.0 | 52.7 | 81.3 | 18.7 |
| N° 8 | 2.360 | 478.0 | 7.7 | 89.0 | 11.0 |
| N° 16 | 1.190 | 150.0 | 2.4 | 91.4 | 8.6 |
| N° 30 | 0.600 | 82.0 | 1.3 | 92.8 | 7.3 |
| N° 50 | 0.300 | 66.0 | 1.1 | 93.8 | 6.2 |
| N° 100 | 0.150 | 80.0 | 1.3 | 95.1 | 4.9 |
| N° 200 | 0.075 | 93.0 | 1.5 | 96.6 | 3.4 |
| Pasante | | 210.0 | 3.4 | 100.0 | 0.0 |

Nota. Elaboración propia.

Tabla 12

Descripción y características del material grueso para moldes

| Descripción | |
|------------------------------------|--------|
| 1. Peso de material | |
| Peso inicial total (kg) | 6198.0 |
| Peso fracción fino para lavar (gr) | 0.0 |
| 2. Características | |
| Tamaño máximo | 3/4" |
| Tamaño máximo nominal | 1/2" |
| Grava (%) | 81.3 |
| Arena (%) | 15.3 |
| Finos (%) | 3.4 |

Nota. Elaboración propia.

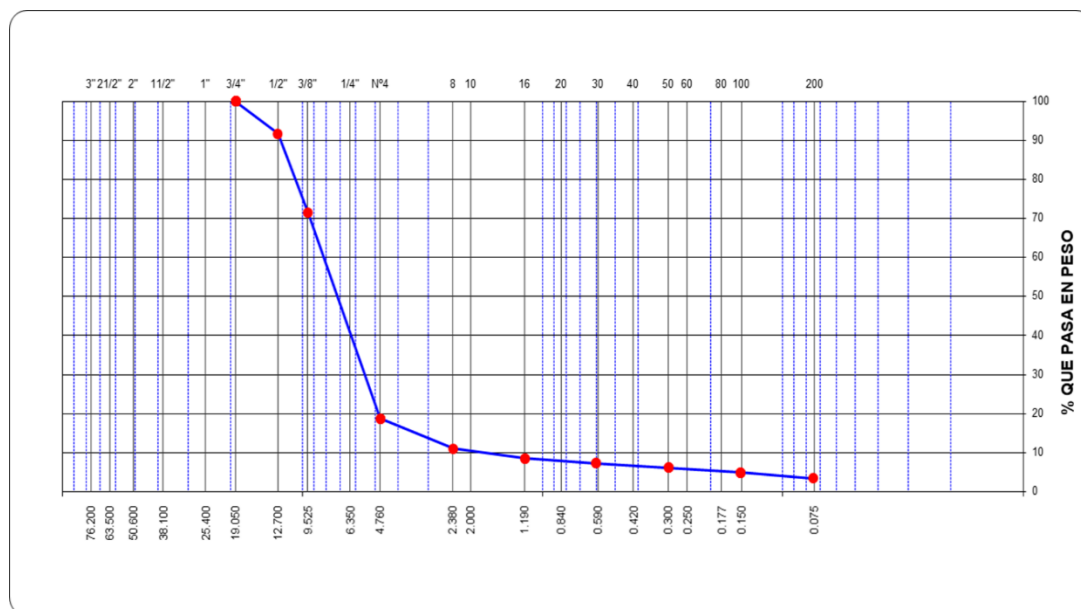


Figura 72 Curva granulométrica del agregado grueso.

Nota. Elaboración propia.

3.3.2 *Elaboración de cilindros*



Figura 73 *Moldes llenos de agregado grueso.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 74 *Moldes llenos de lechada cementicia.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 75 Moldes llenos de agregado grueso y lechada cementicia.

Nota. Elaboración propia.



Figura 76 Muestras de cilindros desmoldados.

Nota. Elaboración propia.

3.3.3 *Medición y rotura de cilindros*

Antes de llevar a cabo los ensayos de compresión simple en las probetas, se procedió a medir cada una de ellas.



Figura 77 *Medición de cilindro piedra-cemento.*

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13

Dimensiones de cilindros del material piedra-cemento

| Muestra material piedra-cemento | | | |
|--|----------------------|--------------------|------------------------------|
| Días | Diámetro (cm) | Altura (cm) | Área (cm²) |
| 7 | 10 | 20 | 78.94 |
| 14 | 10 | 20 | 78.94 |
| 28 | 10 | 20 | 78.94 |

Nota. Elaboración propia.



Figura 78 Cilindro del material piedra-cemento antes de la rotura.

Nota. Elaboración propia.



Figura 79 Cilindro del material piedra-cemento después de la rotura.

Nota. Elaboración propia.

3.3.4 Resultados de los ensayos de laboratorio

Tabla 14

Evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra-cemento

| Resistencia a la compresión simple | |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Tiempo (días) | Muestra (kg/cm ²) |
| 7 | 373.80 |
| 14 | 479.84 |
| 28 | 533.77 |

Nota. Elaboración propia.

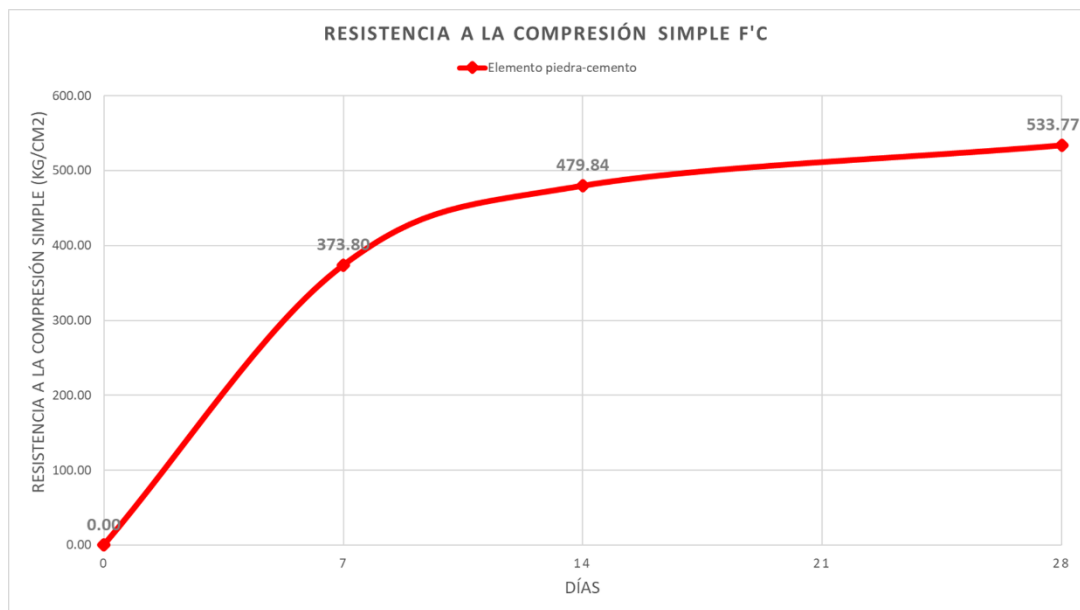


Figura 80 *Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra-cemento.*

Nota. Elaboración propia.

3.4 Tipo de geotextil

El geotextil que se utilizó durante el proceso constructivo fue el de tipo tejido, que es más eficiente para el pilote propuesto, pues se conforma a partir de columnas de grava inyectada y revestida (CPIR), las cuales permiten aguantar la presión lateral ejercida no solo por las gravas, sino también la de la lechada. De esa forma, el geotextil ayuda a evitar la fuga de la lechada hacia el estrato natural.

Por otra parte, el uso de geotextiles en las columnas de piedra inyectadas con resina (CPIR) debe no solo resistir la presión lateral, sino también evitar la pérdida de lechada

desde la columna. En consecuencia, los geotextiles tejidos son más adecuados para esta función en comparación con los no tejidos, debido a su menor permeabilidad. Sin embargo, es fundamental considerar la capacidad de retención de la lechada, lo cual requiere seleccionar un tejido geotextil con un tamaño de apertura de poro extremadamente pequeño.

3.5 Fundición de un tramo de pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de gravas excavadas

Como parte de esta investigación, se realizó la fundición de un tramo del pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de grava excavadas en los alrededores del laboratorio. Esto simuló, de manera parcial, la metodología propuesta en esta tesis, aunque presentó algunas diferencias, pues se buscó que el elemento construido fuera visible sobre la superficie del suelo, y que fuera ejecutado manualmente en lugar de utilizar la maquinaria sugerida originalmente. A continuación, se describe en detalle el proceso constructivo.

1. Excavación manual y colocación de la armadura estructural.



Figura 81 *Excavación y colocación de armado estructural.*

Nota. Elaboración propia.

2. Posicionamiento de camisa de plástico; se usó una tubería corrugada de 400 mm.



Figura 82 *Posicionamiento de camisa de plástico (tubería corrugada de 400 mm).*

Nota. Elaboración propia.

3. Se procedió con la colocación del geotextil, además de la tubería de inyección y reinyección.



Figura 83 *Colocación de geotextil y tubería de inyección-reinyección.*

Nota. Elaboración propia.

4. Llenado del armado estructural con material grueso. Además, se puso una especie de tapón, para evitar que entrara el material grueso por la tubería.



Figura 84 *Vaciado de material grueso en el armado del pilote.*

Nota. Elaboración propia.

5. Una vez preparado todo el armado del pilote, se procedió a realizar la inyección de la lechada cementicia.



Figura 85 *Inyección del pilote con lechada cementicia.*

Nota. Elaboración propia.



Figura 86 *Pilote después de la inyección cementicia.*

Nota. Elaboración propia.

6. Luego de la fundición del pilote inyectado, se procedió a realizar la reinyección.



Figura 87 *Reinyección de pilote inyectado.*

Nota. Elaboración propia.

7. Luego de 14 días de la fundición del pilote inyectado y reinyectado con lechada cementicia a partir de columnas de grava excavadas, se retiraron la camisa de plástico y el geotextil para observar la formación del pilote inyectado y reinyectado.



Figura 88 Retiro de camisa de plástico.

Nota. Elaboración propia.



Figura 89 Pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de gravas excavadas.

Nota. Elaboración propia.

Con respecto al método constructivo propuesto en esta tesis, y para la construcción experimental de un tramo del pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de grava excavadas, se realizó la inyección de la lechada con la camisa aún puesta en el elemento estructural. Dicha camisa no tuvo ninguna falla, puesto que permitió que el elemento estructural se fundiera de manera correcta, si causar ninguna deformación.

Otra diferencia notoria durante la construcción experimental se basó en que la tubería que permite la inyección y la reinyección permanece en el pilote estructural después de desarrollar tales procesos, a diferencia del método propuesto. La decisión se tomó con el propósito de facilitar la comprensión del proceso de inyección y reinyección del pilote estructural.

Conclusiones

Se propuso un nuevo pilote que trabaja por fricción lateral; este no necesita de máquina piloteadora ni de grúa para su fabricación, y su proceso constructivo se realizó a partir de la ejecución de una columna de grava, la cual posee una armadura. En ese sentido, la columna se inyectó a gravedad para la conformación del pilote por un tubo de inyección.

De esa manera, y una vez fraguada la lechada cementicia de inyección, el pilote se reinyectó a partir de la punta, para formar un elemento resistivo que incrementaría sensiblemente su capacidad de soporte, especialmente si se tratara de un grupo de pilotes.

A pesar de lo anterior, y por su simplicidad, el pilote puede fabricarse por parte del constructor, y no se necesitan subcontratistas especializados. Al respecto, cabe recordar que la resistencia a la compresión simple del hormigón del pilote a los 28 días, una vez inyectado, podría ser de 420 kg/cm². Finalmente, los estudios realizados hasta el momento demuestran que este tipo de pilote es más rápido de ejecutar, más seguro y más económico.

Recomendaciones

- Se debe continuar con los estudios de este pilote. Especialmente, se deben desarrollar más pruebas de carga, con el objetivo de perfeccionar la formulación empírica, la cual es necesaria para el diseño de una cimentación que utilice este pilote.

Referencias

- Braja, M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. CENGAGE Learning.
- Bravo, J. (2016). *Mejoramiento masivo de subsuelos mediante pilas de agregado apisonado (RAP) en suelos tipo F según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5372>
- Caro, P., & Manzanal, D. (2019). *Análisis del comportamiento de estructuras de gravedad para infraestructuras portuarias* [Tesis de posgrado]. https://oa.upm.es/58716/1/TFM_PEDRO_CARO_PERDIGON.pdf
- Castellanos, W., & Rodríguez, E. (2022). Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento. *Revista Ingeniería*, 27(2), 1-24. <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>.
- Castro, J. (2021). Avances en el diseño y cálculo de columnas de grava. Parte II: Grupos de columnas y consolidación secundaria. *Informes de la Construcción*, 73(561), 10.3989/ic.71.
- Cedeño, S. (2015). *Estudio de la Evolución de las Propiedades Mecánicas de Pastas y Morteros Proyectado Empleando Ultrasonidos* [Tesis de maestría]. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/78866/TESIS_EdFinalEntrega.pdf
- Chipantaxi, V. (2021). *Estudio de factibilidad técnica para la reinyección de cortes de perforación en el bloque 43 ITT, Campo Tambococha* [Tesis de pregrado]. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23419/1/CD%2012847.pdf>
- Cirion, A., & Chatte, R. (2019). Aplicación de columnas de módulo controlado como cimentación para tanques en zonas sísmicas. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 10.3233/STAL190284. Alfredo Cirion ; Remi Chatte.

- Cobos, L., & Montenegro, G. (2010). *Estudio integrado del golfo de Guayaquil del mioceno al reciente*. ESPOL. FICT.
- Collot, J., Sallares, V., & Pazmiño, N. (2009). *Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador*. Comisión Nacional del Derecho del Mar [CNDM].
- Delgado, R., & Ruiz, E. (2022). *Propuesta de mejora para el proceso de reinyección de cortes de perforación (CRI) en un pozo de la Cuenca Oriente Ecuatoriana Orellana-Ecuador 2021* [Tesis de maestría]. Escuela de Posgrado Newman. https://repositorio.epnewman.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12892/375/TR_ABAJO_DE_INV_MGM_DELGADO_ROBERTO_RUIZ_EDWIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Falla, P. (2021). *Propuesta de mejoramiento de suelos licuables mediante el uso de columnas de grava en áreas portuarias - Puerto del Callao* [Tesis de grado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://upc.aws.openrepository.com/handle/10757/655860>
- Flores, J. (2023). *Tratamiento geotécnico de fundación de la presa Silicucho y su relación con la impermeabilización mediante inyecciones de lechada de cemento, Crucero, Puno* [Tesis de pregrado]. Universidad Continental. file:///C:/Users/user/Downloads/IV_FIN_105_TE_Flores_Ramos_2023.pdf
- Gallardo, G., & Toulkeridis, T. (2008). *Cuevas volcánicas y otras atracciones espeleológicas*. CGVG. https://www.researchgate.net/publication/280331411_CUEVAS_VOLCANICAS_Y_OTRAS_ATRACCIONES_ESPELEOLOGICAS_VOLCANIC_CAVES_AND_OTHER_SPELEOLOGICAL_ATTRACTIONS_Santa_Cruz_-_Galapagos
- García, Á. (2021). *Análisis y selección de un sistema de protección a la corrosión en zona de salpicadura en pilotes de muelles portuarios* [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54737>
- García, M., Manzanal, D., & Carvajal, E. (2019). Análisis de licuefacción y mitigación con columnas de grava. *Revista Digital del Cedex*, (193),

<https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2386#sec-1>.

- Geoestudios S. A. (2015). *Manual Práctico para la Caracterización Geológica, Geotécnica y Sísmica de la Ciudad de Guayaquil*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/sgr-presenta-manual-practico-para-la-caracterizacion-geologica-y-sismica-de-guayaquil/>
- Grados, K., & Serrano, H. (2023). *Influencia del geotextil en el diseño del pavimento flexible en La Libertad entre el tramo km 07+000 hasta el km 11+000, Huanchaco, Trujillo, 2022* [Tesis de grado]. Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/35035/11.%20Formato%20de%20tesis%20KEVIN%2cHUGO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Herrera, C. (2019). *Impermeabilización mediante inyecciones de cemento en macizo rocoso para evitar la surgencia de agua en explotación subterránea Cajamarca* [Tesis de grado]. Universidad Privada del Nort. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/21786/Herrera%20de%20la%20Cruz%20Carmen%20Esther.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Herrera, C. (2019). *Impermeabilización mediante inyecciones de cemento en macizo rocoso para evitar la surgencia de agua en explotación subterránea Cajamarca, 2019* [Tesis de pregrado]. Universidad del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/21786/Herrera%20de%20la%20Cruz%20Carmen%20Esther.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Huete, R., Rubio, P., & Rodriguez, C. (1993). Aplicación de los métodos de ultrasonidos a la verificación de materiales de construcción. *Revista de Edificación. RE*, 9-22.
- Icochea, S. (2019). *Diferencias entre geotextiles de polipropileno y poliéster*. Innovación en Geosintéticos y Construcción. <https://igc.com.pe/diferencias-geotextiles-de-polipropileno-poliester/>
- Jaramillo, K., & Olaya, B. (2020). *Diseño de un pavimento flexible con geotextil tejido en las calles Los Cipreses y Los Pinos del Asentamiento Humano Consuelo de Velasco, Piura 2019* [Tesis de grado]. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/52207>

- Lavado, R. (2024). *Efectos del Uso de las Columnas de Grava como reforzamiento de terreno para la reducción de asentamiento y mejoramiento de capacidad de carga en la construcción de una cámara de bombeo* [Tesis de grado]. Universidad San Ignacio de Loyola. <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/dc5fecc3-9d52-410a-b259-51efc59bb03a>
- Lavenu, A. (2006). Neotectónica de los Andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Bolivia y Chile): una revisión. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4), <https://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v61n4/v61n4a06.pdf>.
- León, M. (2021). Oportunidades para el uso de geotextiles para el tratamiento de aguas grises. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 16(2), 27–33. 10.36829/08ASA.v16i2.1325.
- Loayza, S. (2019). *Determinación de la capacidad portante de arcillas duras y lutitas en la zona costera de ballenita en base a pruebas de carga dinámica* [Tesis de grado]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11168/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-251.pdf>
- Martillo, C., Pasmíño, A., Chunga, K., & Resl, R. (2020). Descripción morfológica de la plataforma continental del Ecuador y análisis comparativo con la plataforma jurídica aplicando la CONVEMAR, mediante el uso de sistemas de información geográfica. *Revista Acta Oceanográfica del Pacífico*, 2(2), <https://actaoceanografica.inocar.mil.ec/index.php/raop/article/view/35>.
- Milián, F. (2005). *Columnas de grava para el mejoramiento de suelos* [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/bitstream/handle/123456789/364/TESIS%20Francisco%20Jos%C3%A9%20Milian%20Gutierrez.pdf?sequence=1>
- Pacheco, R. (2022). *Selección del eje óptimo para la pantalla de impermeabilización utilizando el análisis de criterios múltiples en la presa Ancascocha, Parinacochas Ayacucho 2022* [Tesis de grado]. Universidad Continental. file:///C:/Users/Yadira%20Del%20Valle/Downloads/IV_FIN_105_TE_Pacheco_Laura_2022.pdf

- Paredes, J. (2020). *Evaluación de parámetros geotécnicos de los depósitos de suelo ubicados en la llanura aluvial y en el complejo deltaico estuarino de Guayaquil (ECU), y sectores adyacentes de Daule, Samborondón y Durán, mediante ensayos in situ CPTU*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53892>
- Pilote Terratest. (2020). *Columnas de grava. Vibrosustitución y vibrocompactación*. <https://www.terratest.cl/wp-content/uploads/2020/02/Catalogo-Pilotes-terratest-columna-de-grava.pdf>
- Quijije, A. (2019). *Reforzamiento del suelo con la utilización de geotextiles y geomallas aplicado en la ciudad de Manta* [Tesis de grado]. Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí. <https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/2085/1/ULEAM-IC-0046.pdf>
- Quito, L. (2019). *Influencia del método - inyección tradicional de impermeabilización en la reducción de filtración - presa de relave el porvenir MAPSAC – 2018* [Tesis de pregrado]. Universidad Alas Peruanas. https://repositorio.uap.edu.pe/jspui/bitstream/20.500.12990/2141/1/Tesis_Influencia_Impermeabilizaci%C3%B3n_Reducci%C3%B3n.pdf
- Ramírez, D., & Holguín, J. (2023). *Estudio técnico para la reinyección de cortes de perforación en el bloque 56 en Ecuador* [Tesis de pregrado]. Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10107/4/UPSE-TIP-2023-0020.pdf>
- Ruiz, S., & Pineda, E. (2022). *Análisis de la mitigación de licuefacción del suelo aplicando el diseño de columnas de grava compactada en el Colegio Jacobo, Catacaos, Piura 2022* [Tesis de grado]. Universidad César Vallejo. <https://core.ac.uk/download/561060202.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano. (22 de 03 de 2017). *Tectónica de placas*. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Tectonica-de-placas.html#>

- Silva, A., & Díaz, Y. (2023). Alternativa de reúso para cortes de perforación contaminados con diésel. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLIV(2), 1-11.
- Souza, T., & Querelli, A. (2023). El uso de la prueba de integridad de pilotes (PIT) para detectar anomalías, como la exposición de refuerzo, en cajones cortos. *Revista DYNA*, 90(229), 10.15446/dyna.v90n229.107942.
- Useche, D., Aiassa, G., Arrua, P., & Eberhardt, M. (2022). Pilotes perforados con inyección de lechada cementicia en la punta: estudio de casos. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (49), 37 - 42.
- Valdiviezo, K. (2019). *Uso de columnas de grava compactada para aumentar la capacidad portante del suelo en la avenida Sanchez Cerro entre la avenida Chulucanas y avenida Mártires de Uchuraccay, ubicada en el distrito de Piura – provincia de Piura – departamento de Piura*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUMP_65f2e3e74cab941597cfb3a35c1956d4/Description#tabnav
- Vallarino, R., Mejía, G., & Grajales, F. (2023). Estudio del comportamiento de pilotes bajo carga lateral en arcilla mediante el método de curvas p-y. *Revista de I+D Tecnológico*, 19(1), <http://portal.amelica.org/ameli/journal/339/3394328001/>.
- Vargas, N. (2020). *Estado del arte: una visualización al desarrollo de geotextiles y suelos transparentes* [Tesis de grado]. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/42fa54a5-1195-4d56-b66f-b5d29a587c93/content>
- Vidaud, E., & Vidaud, I. (2016). Ultrasonido: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico. *Revista Ciencia y Tecnología*, 32-35.
- Vite, E. (2019). *Mejoramiento de capacidad de soporte del suelo de fundación por incorporación de sistema de subdrenaje en el km 8+500 al km 9+500 con problemas de filtraciones en la carretera Alto Chira - Sullana - Piura* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Piura. <https://core.ac.uk/download/pdf/328027482.pdf>
- Yepes, V. (2019). *Concepto de pilote y clasificaciones*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/01/17/concepto-de-pilote-y-clasificaciones/>

Yepes, V. (11 de Febrero de 2019). *Pilotes inyectados*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/02/11/pilotes-inyectados/>

Yepes, V. (2020). *Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención*. Editorial Universitat Politècnica de València.

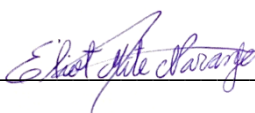


Declaración y autorización

Yo, **Mite Naranjo, Eliot**, con C. C. 0930043732, autor del trabajo de titulación **Pilotes inyectados y reinyectados con lechada cementicia a partir de columnas de grava excavadas**, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil:

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 4 de septiembre de 2024.

F. 

Nombre: **Mite Naranjo, Eliot**

C. C. **0930043732**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

| | | | |
|---|---|-------------------------------|-----|
| Tema y subtema: | Pilotes inyectados y reinyectados con lechada cementicia a partir de columnas de grava excavadas. | | |
| Autor(es): | Mite Naranjo, Eliot | | |
| Revisor(es)/tutor(es): | Ing. Colón Gilberto Martínez Rehpani, M.Sc. | | |
| Institución: | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. | | |
| Facultad: | Facultad de Ingeniería | | |
| Carrera: | Ingeniería Civil | | |
| Título obtenido: | Ingeniero Civil | | |
| Fecha de publicación: | 4 de septiembre de 2024 | N° de páginas: | 120 |
| Áreas temáticas: | Ingeniería, geotecnia, construcción | | |
| Palabras claves/ keywords: | Pilotes inyectados, pilotes reinyectados, geotextil, cimentaciones profundas, pilotes estructurales, suelos blandos | | |
| Resumen: | <p>Este presente trabajo de titulación tiene como objetivo realizar una investigación bibliográfica sobre el uso, los principios teóricos y la aplicación de los pilotes inyectados y reinyectados. Asimismo, se propone un nuevo elemento estructural enfocado en las cimentaciones profundas para los suelos blandos en la ciudad de Guayaquil, y se presenta una metodología constructiva viablemente económica para este elemento estructural. El elemento propuesto es el pilote inyectado y reinyectado a partir de columnas de grava excavadas, que es una combinación del enfoque mencionado, donde se aprovechan materiales y métodos de construcción que resultan más rápidos y económicos. El diseño de la lechada cementicia y la granulometría óptima realizada en laboratorio permitiría que la primera alcanzara una resistencia para trabajar el pilote de manera eficiente por la inyección y la reinyección en la punta no solo por fuste, sino también por punta, debido al sistema radicular obtenido en la punta por la reinyección.</p> | | |
| Adjunto PDF: | <input checked="" type="checkbox"/> Sí | <input type="checkbox"/> No | |
| Contacto con autor/es: | Teléfono: +593-97 878 9197 | E-mail: eliot_m27@hotmail.com | |
| Contacto con la institución (coordinador del proceso UTE): | Nombre: Clara Glas Cevallos | | |
| | Teléfono: +593-4 -2206956 | | |
| | E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec | | |
| Sección para uso de biblioteca | | | |
| N° de registro (con base en datos): | | | |
| N° de clasificación: | | | |
| Dirección URL (tesis en la web): | | | |