



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil para
mejoramiento de suelos blandos de Guayaquil.**

AUTOR:

Espinel Acosta, Alan Fernando

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Martínez Rehpani, Colón Gilberto M.Sc.

Guayaquil, Ecuador

09 de febrero del 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 **Espinel Acosta Alan Fernando**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Martínez Rehpani, Colón Gilberto M.Sc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther M. Sc.

Guayaquil, a los 9 días del mes de febrero del año 2024



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo: **Espinel Acosta, Alan Fernando**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación: **Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil para mejoramiento de suelos blandos de Guayaquil**, 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.

EL AUTOR:

f.  _____

Espinel Acosta, Alan Fernando

Guayaquil, a los 9 días del mes de febrero del año 2024



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

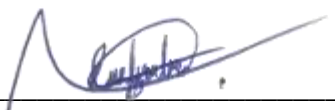
AUTORIZACIÓN

Yo: **Espinel Acosta, Alan Fernando**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil para mejoramiento de suelos blandos de Guayaquil**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 9 días del mes de febrero del año 2024


EL AUTOR:

f. 

Espinel Acosta, Alan Fernando

REPORTE DE COMPILATO

Ing. Martínez Rehpani, Colón Gilberto M.Sc.



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

ESPINEL_ALAN_Borrador

01Fe24

4%

Textos sospechosos

3%

Similitudes

+ 1% similitudes entre comillas
+ 1% entre las frases
memorizadas

3%

Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: ESPINEL_ALAN_Borrador_01Fe24.docx

ID del documento: 2b379d8b1a25c1d0f9a7985a8ba80b4a8c1

Tamaño del documento original: 16,09 MB

Depositar: Clara Catalina Giles Cevallos

Fecha de depósito: 3/2/2024


Tipo de carga: interface

Fecha de fin de análisis: 3/2/2024

Número de palabras: 20.752

Número de caracteres: 138.940

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.uscg.edu.ec http://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf 42 fuentes similares	3%		Palabras idénticas: 3% (608 palabras)
2	repositorio.uscg.edu.ec https://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf 18 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (404 palabras)
3	TESIS.docx tesis #16702 20 documentos similares de un grupo 34 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (374 palabras)
4	repositorio.uscg.edu.ec http://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf 38 fuentes similares	1%		Palabras idénticas: 1% (210 palabras)
5	repositorio.uscg.edu.ec http://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf 28 fuentes similares	1%		Palabras idénticas: 1% (202 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	ebooks.google.com	< 1%		Palabras idénticas: + 1% (177 palabras)
2	Documento de otro usuario: #60470 20 documentos similares de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: + 1% (177 palabras)
3	Documento de otro usuario: #714472 20 documentos similares de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: + 1% (170 palabras)
4	www.tesisenred.net https://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf	< 1%		Palabras idénticas: + 1% (152 palabras)
5	Documento de otro usuario: #705710 20 documentos similares de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: + 1% (148 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1. <http://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf>
2. <https://www.ecoemmaria.com/actualidad/seguridad/zonas-guayambú-suaviza-inundaciones-trafico.html>
3. <https://www.un.org/sustentable/developmentes/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
4. <https://repositorio.uscg.edu.ec/handle/123456789/10000/1/0000-0000-0000-0000.pdf>
5. https://www.academia.edu/3565522/Geologia_y_Geofisica_Marina_y_Terrestre_del_Ecuador

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi padre, quien fue un pilar fundamental en mi desarrollo y en mis estudios, su dedicación y apoyo continúan siendo mi mayor inspiración. A mi madre, agradezco por su inquebrantable amor y constante respaldo en todos los aspectos de mi vida.

A mis queridos hermanos, agradezco el amor incondicional y el apoyo constante que siempre me brindan sin importar que.

Extiendo mi gratitud a mi tutor de tesis, el Ing. Gilberto Martínez, quien fue un gran guía durante todo el desarrollo de la presente tesis. Así mismo quiero agradecer a todos los docentes de la carrera, agradezco profundamente por compartir sus conocimientos y contribuir de manera significativa a mi formación.

DEDICATORIA.

Con profundo cariño y agradecimiento, dedico este logro a mi amada familia. Su inquebrantable apoyo, amor y comprensión han sido mi fortaleza a lo largo de este viaje académico. Cada uno de ustedes ha sido parte esencial en mi desarrollo, y este logro no habría sido posible sin su constante aliento. A mi familia, les dedico este logro como expresión de mi agradecimiento y del inmenso amor que les tengo. Gracias por ser mi fuente de inspiración y por acompañarme en cada paso de este camino.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Ing. Martínez Rehpani, Colón Gilberto, M.Sc.
TUTOR**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Ing. Federico Von Buchwald de Janon, Ph.D.
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

f. _____

**Ing. Grau Sacoto, Carlos, M.Sc.
DOCENTE DELEGADO**

f. _____

**Ing. Grau Sacoto, Francisco, M.Sc.
OPONENTE**

Contenido

RESUMEN	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
INTRODUCCIÓN	2
Antecedentes.....	2
Suelos blandos en Guayaquil.....	2
Inundaciones en Guayaquil.....	3
Descripción del problema.....	4
Justificación.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO.....	7
1.1 Marco normativo.....	7
1.1.1 Constitución de la República.....	7
1.1.2 Tratados internacionales de derechos humanos.....	7
1.1.3 Código Orgánico del Ambiente.....	8
1.1.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente.....	8
1.1.5 Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	9
1.1.6 Plan Creando Oportunidades.....	10
1.2 Marco geológico y sismicidad.....	10
1.2.1 Subducción placa de Nazca y Sudamericana.....	10
1.2.2 Punto caliente de las Galápagos.....	12
1.2.3 Cordillera submarina de Carnegie.....	13
1.2.4 Golfo de Guayaquil.....	14
1.2.5 Megafalla Guayaquil – Dolores.....	15
1.3 Licuación de suelos.....	16

1.4	Suelos tipo F.....	18
CAPITULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....		21
2.1	Columnas de piedra.....	21
2.1.1	Métodos constructivos.....	23
2.1.2	Dimensiones y proceso constructivo.....	27
2.2	Columnas de piedra reforzadas con geotextil.....	31
2.2.1	Métodos constructivos.....	33
2.2.2	Propiedades del material granular.....	35
2.2.3	Elección del geotextil apropiado.....	35
2.2.4	Comparación del comportamiento de las columnas de piedra ordinarias y las columnas de piedra encapsuladas con geotextil.....	37
2.2.5	Comportamiento de las columnas de piedra encapsuladas según el tipo de geotextil.....	38
2.3	Columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento.....	40
2.3.1	Reconstrucción de la vía férrea entre Berlín y Hamburgo. (1993 – 1995; 2003) 41	
2.3.2	Construcción de un terraplén para la autopista de circunvalación Ningbo Ring Road Expressway(G1501), Ningbo, Provincia de Zhejiang, China. (2007).....	48
2.3.3	DISEÑO PRELIMINAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN CENTRO COMERCIAL EN MUĞLA-MILAS, TURQUÍA. (2021).....	54
CAPITULO III. PROPUESTA DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO PARA MEJORAMIENTO DE SUELOS BLANDOS.....		56
3.1	Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil.....	56
3.1.1	Proceso constructivo.....	57
3.2	Ensayos de laboratorio de la lechada de cemento.....	67
3.2.1	Diseño de lechada de cemento.....	67
3.2.2	Elaboración de la lechada de cemento y llenado de probetas.....	68

3.2.3	Medición y rotura de probetas.	71
3.2.4	Resultados de los ensayos de laboratorio.....	77
3.3	Ensayos de laboratorio del material piedra – cemento.....	81
3.3.1	Granulometría de la piedra.....	81
3.3.2	Elaboración de las probetas.	83
3.3.3	Medición y rotura de las probetas.	85
3.3.4	Resultados de los ensayos de laboratorio.....	87
3.4	Tipo de geotextil.....	88
3.5	Fundición en laboratorio de un tramo de columna de piedra inyectada y revestida con geotextil.....	89
3.6	Análisis de precios unitarios del elemento propuesto.	96
3.7	Resultados y discusiones.	98
3.7.1	Método constructivo propuesto para las columnas de piedras inyectadas y revestidas (CPIR).	98
3.7.2	Resistencia del elemento obtenida.	98
3.7.3	Tipo de geotextil.	99
3.7.4	CPIR como método de mejoramiento de suelos blandos.....	99
	CONCLUSIONES	100
	RECOMENDACIONES	101

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Clasificación de los perfiles del suelo.</i>	19
Tabla 2. <i>Diseño de lechada de cemento.</i>	67
Tabla 3. <i>Diseño de lechada de cemento para un metro cúbico.</i>	68
Tabla 4. <i>Pesaje y medición de las probetas de lechada de las muestras “A, B y C”, a los 7 días.</i>	74
Tabla 5. <i>Pesaje y medición de las probetas de lechada de las muestras “A, B y C”, a los 14 días.</i>	74
Tabla 6. <i>Pesaje y medición de las probetas de lechada de las muestras “A, B y C”, a los 28 días.</i>	74
Tabla 7. <i>Evolución de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada de cemento (A, B y C).</i>	77
Tabla 8. <i>Granulometría de la piedra para las probetas.</i>	81
Tabla 9. <i>Coeficientes de curvatura (Cc) y uniformidad (Cu) de la piedra para las probetas.</i>	83
Tabla 10. <i>Dimensiones de las probetas del material piedra – cemento.</i>	86
Tabla 11. <i>Evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra – cemento.</i>	87

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Mapa geomorfológico de la ciudad de Guayaquil.</i>	2
Figura 2. <i>Zona inundada en el norte de Guayaquil.</i>	4
Figura 3. <i>Zona de subducción.</i>	11
Figura 4. <i>Mapa estructural en la zona de subducción de la placa de Nazca y la Sudamericana.</i>	12
Figura 5. <i>Punto caliente de las Galápagos.</i>	13
Figura 6. <i>Fondos y límites marinos del Ecuador: Características morfológicas de la plataforma ecuatoriana.</i>	14
Figura 7. <i>Golfo de Guayaquil.</i>	15
Figura 8. <i>Zona de megafalla Guayaquil – Dolores.</i>	16
Figura 9. <i>Reordenamiento de partículas y asentamientos de suelo durante la ocurrencia de un sismo.</i>	17
Figura 10. <i>Flotación y ahuellamiento de depósitos de arena en licuación.</i>	18
Figura 11. <i>Criterio de adecuación de suelos por vibrocompactación según granulometría.</i> .22	
Figura 12. <i>Esquema de construcción por vibrosustitución.</i>	24
Figura 13. <i>Esquema de construcción por vibrodesplazamiento.</i>	25
Figura 14. <i>Vibradores para alimentación por fondo, bottom feed, (izquierda) y en superficie, top feed, (derecha).</i>	26
Figura 15. <i>Tratamiento del terreno con columnas de grava, en función de la altura del terraplén.</i>	27
Figura 16. <i>Tensiones y deformación de las columnas de grava al ser cargadas.</i>	30
Figura 17. <i>Esquema de columna encapsulada de piedra reforzada con geotextil.</i>	32
Figura 18. <i>Método por desplazamiento para la construcción de las columnas encapsuladas con geotextil.</i>	33
Figura 19. <i>Método de sustitución para la construcción de las columnas encapsuladas con geotextil.</i>	34

Figura 20. Cuadro de diseño para el cálculo de la tensión requerida por el geotextil en columnas encapsuladas.	36
Figura 21. Gráficas de respuesta “Presión – Asentamiento” de columnas individuales. (a) ESCs con geotextiles no tejidos; (b) ESCs con geotextiles tejidos.	38
Figura 22. Respuesta aislada de columnas de piedra encapsuladas de 75mm de diámetro en diferentes tipos de geosintéticos.	39
Figura 23. Respuesta en conjunto de columnas de piedra encapsuladas de 75 mm de diámetro en diferentes tipos de geotextiles.	39
Figura 24. Sistema de terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos.....	42
Figura 25. Mecanismo de transferencia de carga de las cimentaciones tipo GPE.	43
Figura 26. Sección transversal típica y perfil del suelo antes del mejoramiento de suelo.	44
Figura 27. Sección transversal típica de la primera reconstrucción.	45
Figura 28. Área de inspección donde se observan las columnas cementadas con diferentes alturas.	46
Figura 29. Campo de pruebas reconstruido.	47
Figura 30. Sección transversal típica de la segunda reconstrucción.	48
Figura 31. Marco para instalación de las columnas de grava inyectada.....	49
Figura 32. Proceso de la construcción de las columnas de grava inyectadas: (a) perforación, (b) instalación del tubo para la inyección de lechada, (c) colocación de piedra, (d) limpieza de la perforación con agua, (e) inyección de lechada de cemento, (f) fundición del plinto en la parte superior de la columna inyectada.	50
Figura 33. Propiedades del suelo en el sitio.	51
Figura 34. Sección transversal de los accesos del puente.	52
Figura 35. Curvas de carga – asentamiento de una columna inyectada y de un pilote perforado.	53
Figura 36. Perfil del suelo y resultados de los ensayos de sitio (SPT).	54
Figura 37. Proceso constructivo para la metodología propuesta.....	57
Figura 38. Proceso constructivo para la metodología propuesta.....	58

Figura 39. <i>Hinca de la camisa metálica recuperable por presión hidráulica.</i>	59
Figura 40. <i>Camisa metálica armada por tramos.</i>	59
Figura 41. <i>Punta de la camisa metálica recuperable cerrada.</i>	60
Figura 42. <i>Punta de la camisa metálica recuperable abierta.</i>	60
Figura 43. <i>Colocación del geotextil tubular en la camisa.</i>	61
Figura 44. <i>Geotextil tubular colocado en la camisa metálica.</i>	61
Figura 45. <i>Colocación del tubo de inyección.</i>	62
Figura 46. <i>Llenado del geotextil con piedra.</i>	62
Figura 47. <i>Llenado del geotextil con piedra.</i>	63
Figura 48. <i>Llenado del geotextil con piedra, usando el embudo.</i>	63
Figura 49. <i>Finalización del llenado de la piedra.</i>	64
Figura 50. <i>Camisa metálica retirada.</i>	64
Figura 51. <i>Inyección de la lechada de cemento en la columna de grava.</i>	65
Figura 52. <i>Inyección de la lechada de cemento en la columna de grava.</i>	65
Figura 53. <i>Detalle de la columna de piedra inyectada y revestida con geotextil construida.</i> ..	66
Figura 54. <i>Columnas de piedras inyectadas y revestidas con geotextil construidas.</i>	66
Figura 55. <i>Cuantificación del cemento.</i>	68
Figura 56. <i>Cuantificación del agua.</i>	69
Figura 57. <i>Cuantificación y mezcla del aditivo plastificante.</i>	69
Figura 58. <i>Elaboración de la lechada de cemento.</i>	70
Figura 59. <i>Llenado de los moldes con lechada de cemento.</i>	70
Figura 60. <i>Probetas desmoldadas.</i>	71
Figura 61. <i>Medición de las probetas.</i>	71
Figura 62. <i>Pesaje de las probetas.</i>	72
Figura 63. <i>Grupo de probetas, muestra A.</i>	72
Figura 64. <i>Grupo de probetas, muestra B.</i>	73

Figura 65. <i>Grupo de probetas, muestra C.</i>	73
Figura 66. <i>Características de la máquina de prueba de fuerza compresiva simple utilizada para los ensayos.</i>	75
Figura 67. <i>Ajuste de la probeta en la máquina.</i>	76
Figura 68. <i>Probeta antes y después del ensayo.</i>	76
Figura 69. <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra A.</i>	77
Figura 70. <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra B.</i>	78
Figura 71. <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra C.</i>	78
Figura 72. <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestras A, B y C.</i> 79	
Figura 73. <i>Gráfico comparativo de la resistencia a compresión simple a los 7 días de las muestras de lechada de cemento A, B y C.</i>	79
Figura 74. <i>Gráfico comparativo de la resistencia a compresión simple a los 14 días de las muestras de lechada de cemento A, B y C.</i>	80
Figura 75. <i>Gráfico comparativo de la resistencia a compresión simple a los 28 días de las muestras de lechada de cemento A, B y C.</i>	80
Figura 76. <i>Curva granulométrica de la piedra para las probetas.</i>	82
Figura 77. <i>Llenado de los moldes con piedra.</i>	83
Figura 78. <i>Llenado de los moldes con lechada de cemento.</i>	84
Figura 79. <i>Finalización del llenado de los moldes.</i>	84
Figura 80. <i>Cilindro desmoldado.</i>	85
Figura 81. <i>Medición de las probetas.</i>	85
Figura 82. <i>Probeta antes y después del ensayo.</i>	86
Figura 83. <i>Pedazo de probeta de hormigón después de la rotura durante el ensayo de compresión simple.</i>	87
Figura 84. <i>Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra – cemento.</i>	88
Figura 85. <i>Introducción de la camisa de PVC en el suelo.</i>	89

Figura 86. <i>Medición del volumen de la camisa de PVC.</i>	90
Figura 87. <i>Colocación del geotextil tubular y el tubo de inyección dentro de la camisa de PVC.</i>	90
Figura 88. <i>Colocación de piedra dentro del geotextil.</i>	91
Figura 89. <i>Columna de piedra antes de ser inyectada</i>	91
Figura 90. <i>Columna de piedra siendo inyectada.</i>	92
Figura 91. <i>Columna de piedra durante la inyección.</i>	92
Figura 92. <i>Columna de piedra después de la inyección.</i>	93
Figura 93. <i>Retiro de la camisa de PVC</i>	93
Figura 94. <i>Abultamiento de la columna debido a falla de la camisa de PVC.</i>	94
Figura 95. <i>Retiro del geotextil.</i>	94
Figura 96. <i>Columna de piedra inyectada y revestida con geotextil</i>	95

RESUMEN

En el presente Trabajo de Titulación se realiza una investigación bibliográfica exhaustiva sobre el uso, aplicación, principios teóricos y enfoque metodológicos de las columnas de piedra revestidas con geotextil y las columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento. Se analizan casos de estudio sobre construcciones que emplean estos sistemas y se evalúa el desempeño que presentan los mismos.

Posteriormente, se propone la implementación de un nuevo elemento constructivo basado en estos enfoques para el mejoramiento de suelos blandos en la ciudad de Guayaquil, así como una metodología constructiva económicamente viable para este elemento. La metodología propuesta está diseñada para su aplicación en suelos sumamente blandos donde la maquinaria de construcción común enfrenta limitaciones de acceso.

El elemento constructivo propuesto es la columna de piedra inyectada y revestida con geotextil, el cual combina ambos enfoques antes mencionados y aprovecha los materiales de manera que la construcción del elemento resulte rápida y económica. Se llevan a cabo ensayos para obtener una lechada de cemento y una granulometría de la piedra que posibiliten la incorporación óptima de ambos materiales en el elemento, asegurando condiciones adecuadas.

En este diseño, el geotextil funciona como una barrera que impide la fuga de la lechada de cemento fuera del elemento hacia el suelo circundante, y a su vez, evita que el agua del nivel freático se mezcle con la lechada dentro del elemento.

Palabras clave: Columnas de Piedra, Inyecciones de Lechada de Cemento, Geotextil, Mejoramiento de Suelos, Columnas de Piedra Inyectadas, Columnas de Piedra Revestidas con Geosintéticos, Suelos Blandos.

ABSTRACT

This Thesis Work conducts a comprehensive literature review on the use, application, theoretical principles, and methodological approaches of encased stone columns and grouted stone columns. Case studies of constructions employing these systems are analyzed, and their performance is evaluated.

Subsequently, the implementation of a new construction element based on these approaches is proposed for soil improvement in the city of Guayaquil, along with an economically viable construction methodology for this element. The proposed methodology is designed for application in extremely soft soils where conventional construction machinery faces access limitations.

The proposed construction element is the grouted stone column encased with geotextile, combining both aforementioned approaches and leveraging materials to ensure a rapid and cost-effective construction process. Tests are conducted to obtain a cement slurry and stone granulometry that enable the optimal incorporation of both materials into the element, ensuring suitable conditions.

In this design, the geotextile acts as a barrier preventing the leakage of cement slurry from the element into the surrounding soil and, simultaneously, preventing groundwater from mixing with the slurry inside the element.

Keywords: Stone Columns, Grout Injections, Geotextile, Soil Improvement, Grouted Stone Columns, Geosynthetic Encased Stone Columns, Soft Soils.

INTRODUCCIÓN

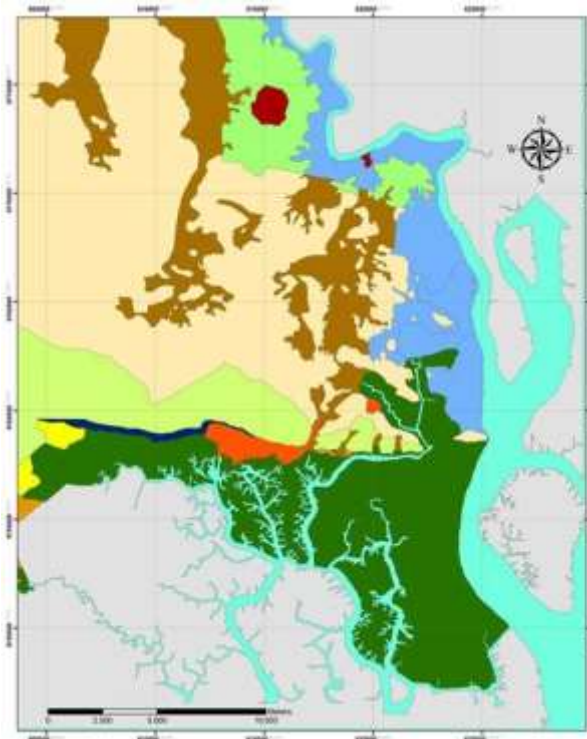
Antecedentes.

Suelos blandos en Guayaquil.

La ciudad de Guayaquil se caracteriza por la presencia de suelos blandos, incluyendo arcillas blandas, depósitos de turba y arcillas marinas, que forman parte del complejo estuarino sedimentario deltaico del Golfo de Guayaquil. Estos suelos, definidos como suelos tipo F según la norma NEC-15, presentan características problemáticas para la construcción civil debido a su baja resistencia al corte, alta compresibilidad y tendencia al flujo lateral. Además, se encuentran estratos con suelos potencialmente licuables.

En la Figura 1 se puede observar áreas de suelos aluviales depositados recientemente por el río Daule, resaltadas en tono celeste, y en verde oscuro se distinguen suelos estuarinos recientemente depositados por el río Guayas.

Figura 1. Mapa geomorfológico 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, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, p. 15. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5372>

De manera general, para ejecutar una cimentación segura en estos suelos blandos lo más común es utilizar cimentaciones profundas o sustituir el suelo de cimentación. Sin embargo, estas soluciones conllevan inconvenientes, altos costos y largos tiempos de ejecución, así como movimientos de fango que traen como consecuencia perturbaciones en el entorno durante la construcción.

Inundaciones en Guayaquil.

Guayaquil ha enfrentado desafíos recurrentes relacionados con inundaciones que han afectado a la ciudad de diferentes maneras. La ciudad es particularmente vulnerable a eventos climáticos extremos como fuertes lluvias y mareas altas debido a su ubicación geográfica, situada a nivel del mar, atravesada por ramales del estero Salado y el río Guayas.

La topografía plana de la región, combinada con un crecimiento urbano rápido y desordenado, hacen que Guayaquil tienda a acumular agua en áreas urbanas, generando problemas en la infraestructura y en la calidad de vida de sus habitantes. Según Hallegatte et al. (2013), Guayaquil se encuentra entre las 10 ciudades más vulnerables a inundaciones del mundo, debido a la alta exposición de su infraestructura a zonas susceptibles a anegarse y a la falta de defensas para inundaciones.

Los sistemas de drenaje e infraestructuras de control de inundaciones han sido históricamente insuficientes para hacer frente a eventos climáticos extremos, lo que ha provocado inundaciones periódicas en varias partes de la ciudad. Además, las lluvias intensas pueden saturar rápidamente los sistemas de alcantarillado y desbordar ríos, afectando tanto a zonas residenciales como a áreas comerciales. Los impactos de estas inundaciones no se limitan solo a daños materiales, también afectan la salud pública, la movilidad urbana y la economía local.

Es por esta razón que se vuelve imprescindible recurrir a métodos constructivos alternativos cuya aplicación sea viable en suelos anegados. La implementación exitosa de estos enfoques en terrenos inundables no solo garantiza la estabilidad de las estructuras, sino que también contribuye al buen rendimiento de las estructuras frente a eventos extremos.

Figura 2. Zona inundada en el norte de Guayaquil.



Nota: Tomado de “*Varias zonas de Guayaquil quedaron anegadas por fuerte lluvia*”, por J. Holguín, 2022, El Comercio. <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/zonas-guayaquil-lluvias-inundaciones-trafico.html>

Descripción del problema.

La problemática que aborda esta tesis principalmente son los desafíos y dificultades asociados con la construcción en Guayaquil, que presenta características particulares, como suelos extremadamente blandos y una gran vulnerabilidad a las inundaciones. El análisis se centra específicamente en los suelos clasificados como tipo "F" según la Norma Ecuatoriana de la Construcción, los cuales, al tener una resistencia al corte no drenado notablemente baja, plantean complicaciones sustanciales para la implementación de técnicas constructivas convencionales.

En estas zonas inundables de suelos extremadamente blandos, la maquinaria habitualmente empleada en proyectos de construcción enfrenta desafíos significativos. La baja resistencia al corte no drenado de estos suelos afecta la maniobrabilidad de la maquinaria, aumentando en gran medida el riesgo de hundimientos y reduciendo la eficiencia en la ejecución de las tareas constructivas. Esto no solo genera dificultades al momento de construir, sino que también eleva considerablemente los costos de construcción, ya que se hace necesario el uso de métodos más complejos y con tiempos de construcción prolongados para garantizar la estabilidad de las estructuras. Adicionalmente, durante dicho tipo de construcción, es preciso efectuar grandes movimientos de fango, lo cual puede influir en el entorno causando perturbaciones en el mismo.

Justificación.

La consecuencia directa de la problemática abordada en los antecedentes de esta tesis es que la construcción en este tipo de suelos en Guayaquil actualmente es escasa y generalmente con precios muy elevados comparados con construcciones similares en otras zonas.

Esta tesis busca plantear una solución a la necesidad urgente de implementar métodos constructivos alternativos que garanticen la estabilidad de las estructuras, reducción de costos y disminución del impacto en el entorno. La consecución de dichos fines, a su vez, coadyuvarían a la generación e incremento de las actividades constructivas en estas zonas, propiciando un desarrollo poblacional más sostenible en la ciudad.

Objetivo general.

Desarrollar un nuevo elemento constructivo, más económico y sustentable, que pueda incorporarse a la estructura de las edificaciones para evitar los desplazamientos laterales del suelo e incrementar la capacidad de soporte de las mismas. Para el efecto, se establecerán criterios para el proceso de instalación de columnas de piedra necesarias para el mejoramiento de las arcillas muy blandas de Guayaquil, mediante el uso de un revestimiento geotextil alrededor de cada elemento; así como, una inyección de lechada de cemento en cada columna.

Objetivos específicos.

- Analizar de manera global tres investigaciones a nivel planetario, relacionadas con el uso de columnas de piedra utilizadas para el mejoramiento de suelos muy blandos y que: a) hayan sido reforzadas con geotextiles para evitar el desplazamiento lateral del suelo; b) hayan sido inyectadas con lechada de cemento para aumentar su capacidad de soporte; y c) definan el geotextil apropiado para revestir las columnas de piedra en las arcillas muy blandas de Guayaquil.
- Definir con ensayos de Laboratorio: a) la granulometría ideal para las columnas de piedra que posteriormente serán inyectadas con lechada de cemento; b) diseñar una lechada de inyección de cemento apropiada para estas columnas de piedra; c) establecer la resistencia a la compresión simple en roturas de probetas, para este material previamente inyectado en estos especímenes; d) realizar un video de la fundición en Laboratorio de un tramo de columna de piedra, reforzada con geotextil e inyectada con

lechada de cemento donde, posteriormente, se realice 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: a) la apertura del hueco por desplazamiento, en arcillas muy blandas de Guayaquil; b) la instalación del geotextil y el llenado de la columna de piedra; c) el proceso de inyección con lechada de cemento en una columna de piedra; d) el arreglo general de las columnas de piedra para su incorporación al sistema estructural de la edificación.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO.

1.1 Marco normativo.

1.1.1 Constitución de la República.

La convivencia social del ser humano a lo largo de la historia se ha visto transformada por condiciones sociales, económicas y ambientales, las cuales han evolucionado y ha surgido la necesidad de regular sus interacciones a través de normativa vinculante que establezca el marco dentro del cual el hombre adecue sus actuaciones.

De esta manera, en el caso específico del Ecuador, la Constitución de la República en aras de regular la interacción entre el ser humano y la naturaleza, reconoce a esta última como sujeto de los derechos reconocidos en el texto constitucional.¹ Para el efecto, la antedicha norma suprema declara de interés público la preservación del ambiente,² reconoce como una obligación de los ecuatorianos y ecuatorianas el respeto a la naturaleza y la preservación de un ambiente sano, así como la utilización de los recursos naturales de modo racional, sustentable y sostenible.³

La Constitución, además, reconoce a los ecuatorianos el derecho a una vivienda adecuada y digna, para lo cual se encargará de elaborar, implementar y evaluar políticas, planes y programas de hábitat y acceso universal a la vivienda, con fundamento en los principios de universalidad, equidad e interculturalidad.⁴

1.1.2 Tratados internacionales de derechos humanos.

La Norma Suprema reconoce la prevalencia de la Constitución y tratados internacionales de derechos humanos ratificados por el Estado que reconozcan derechos más favorables, los cuales prevalecerán sobre cualquier otra norma de jurídica o acto del poder público.

En este sentido, el Ecuador ha suscrito y ratificado diversos tratados internacionales de derechos humanos que reconocen y garantizan los derechos a un ambiente sano y al acceso a vivienda digna.

¹ El artículo 10 de la Constitución de la República del Ecuador, publicada mediante Registro Oficial 440 de 20 de octubre de 2008, reconoce como sujeto de derechos constitucionales a la naturaleza.

² Artículo 14, ibídem.

³ Artículo 83, numeral 6 ibídem.

⁴ Artículo 374, ibídem.

1.1.3 Código Orgánico del Ambiente.

En procura de garantizar la vigencia de la Constitución, se promulgó el Código Orgánico del Ambiente⁵, el cual tiene por objeto “*garantizar el derecho a las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como proteger los derechos de la naturaleza para la realización del buen vivir o sumar kawsay.*”⁶

El cuerpo normativo referido, en cuanto al desarrollo del derecho de los ecuatorianos y ecuatorianas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, incluye “*la conservación, preservación y recuperación del suelo que prevenga la erosión, la degradación, la desertificación y permita su restauración.*”⁷

El artículo 9 del Código Orgánico del Ambiente, reconoce los principios ambientales aplicables a todas las decisiones y actividades públicas y privadas en relación con la conservación, uso y manejo sostenible del ambiente, dentro de los cuales reconoce y desarrolla el desarrollo sostenible, en los siguientes términos:

Es el proceso mediante el cual, de manera dinámica, se articulan los ámbitos económicos, social, cultural y ambiental para satisfacer las necesidades de las actuales generaciones, sin poner en riesgo la satisfacción de necesidades de las generaciones futuras. La concepción de desarrollo sostenible implica una tarea global de carácter permanente. Se establecerá una distribución justa y equitativa de los beneficios económicos y sociales con la participación de personas, comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades. (Código Orgánico del Ambiente, 2017)

1.1.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente.

La aplicación del Código Orgánico del Ambiente fue regulada a través de su Reglamento⁸, el cual establece criterios ambientales⁹ para la planificación del desarrollo y el ordenamiento territorial, haciendo obligatorio para todos los niveles de gobierno, entre otros, los siguientes:

c) Armonizar la conservación, protección y restauración del patrimonio natural con su uso y aprovechamiento sostenible;

⁵ El Código Orgánico del Ambiente publicado en el Segundo Suplemento del Registro Oficial No. 938, de 12 de abril de 2017.

⁶ Artículo 1, ibídem.

⁷ Artículo 5 numeral 5, ibídem.

⁸ El Reglamento fue publicado en el Suplemento del Registro Oficial No. 507, de 12 de Junio 2019.

⁹ Artículo 4, ibídem.

g) Orientar las intervenciones en el territorio y el aprovechamiento sostenible de los recursos a través de normas de uso, ocupación y gestión del suelo que definan espacios con diferentes funciones de conservación, restauración y uso sostenible;

De la misma manera, determina dentro de los lineamientos técnico-ambientales para el ordenamiento territorial¹⁰, el siguiente:

c) Identificar áreas críticas para implementar acciones y medidas para la conservación, protección, restauración, manejo y uso sostenible de los recursos naturales, gestión integral de riesgos, prevención y mitigación de impactos ambientales, tanto en suelo rural como urbano;

1.1.5 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El 25 de septiembre de 2015, la Organización de Naciones Unidas (ONU), adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que configuraba un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. La referida Agenda planteó 17 objetivos indivisibles que abarcan los ámbitos económico, social y ambiental.

Mediante Decreto Ejecutivo No. 371/2018, suscrito el 19 de abril de 2018 por el entonces Presidente Constitucional de la República, Lenín Moreno Garcés, se declara como política pública del Gobierno Nacional la adopción de la referida agenda y se compromete a velar por el cumplimiento y efectiva implementación de la misma. A través del referido decreto, se otorga las competencias referentes a la Agenda, en distintas instituciones públicas del país con el fin de su cumplimiento, monitoreo, control y seguimiento debido.

Por su parte, la Asamblea Nacional mediante resolución se comprometió a implementar la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible a través de sus actos legislativos, así como a fomentar mediante la promulgación de leyes, la aprobación de presupuestos y la representación de la sociedad civil con el objetivo de viabilizar el cumplimiento de la Agenda.

De los 17 objetivos planteados en la Agenda, se encuentra el número 11 que corresponde a Ciudades y Comunidades Sostenibles, el cual, dentro de sus 10 metas, incluye las siguientes:

11.1 De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales.

¹⁰ Artículo 5, *ibídem*.

11.5 De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad.

Encontramos también como Objetivo 13, la Acción por el clima, que incluye dentro de sus metas:

13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.

Por último, el objetivo 14 referente a Vida de Ecosistemas Terrestres, incluye:

15.3 Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo.

1.1.6 Plan Creando Oportunidades.

De conformidad con el Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas, el Gobierno Nacional del Ecuador se encuentra en la obligación de efectuar Planes Nacionales de Desarrollo. En el 2021, el Consejo Nacional de Planificación elaboró y aprobó el Plan Creando Oportunidades con vigencia del 2021 al 2025.

Dentro de los 5 ejes sobre los cuales se levantó el referido Plan, se encuentra el Eje de Transición Ecológica, mismo que entre sus políticas y lineamientos territoriales, recoge:

Regular los asentamientos humanos en las zonas de planificación diferenciada, considerando sus límites biofísicos y patrimonio natural.

1.2 Marco geológico y sismicidad.

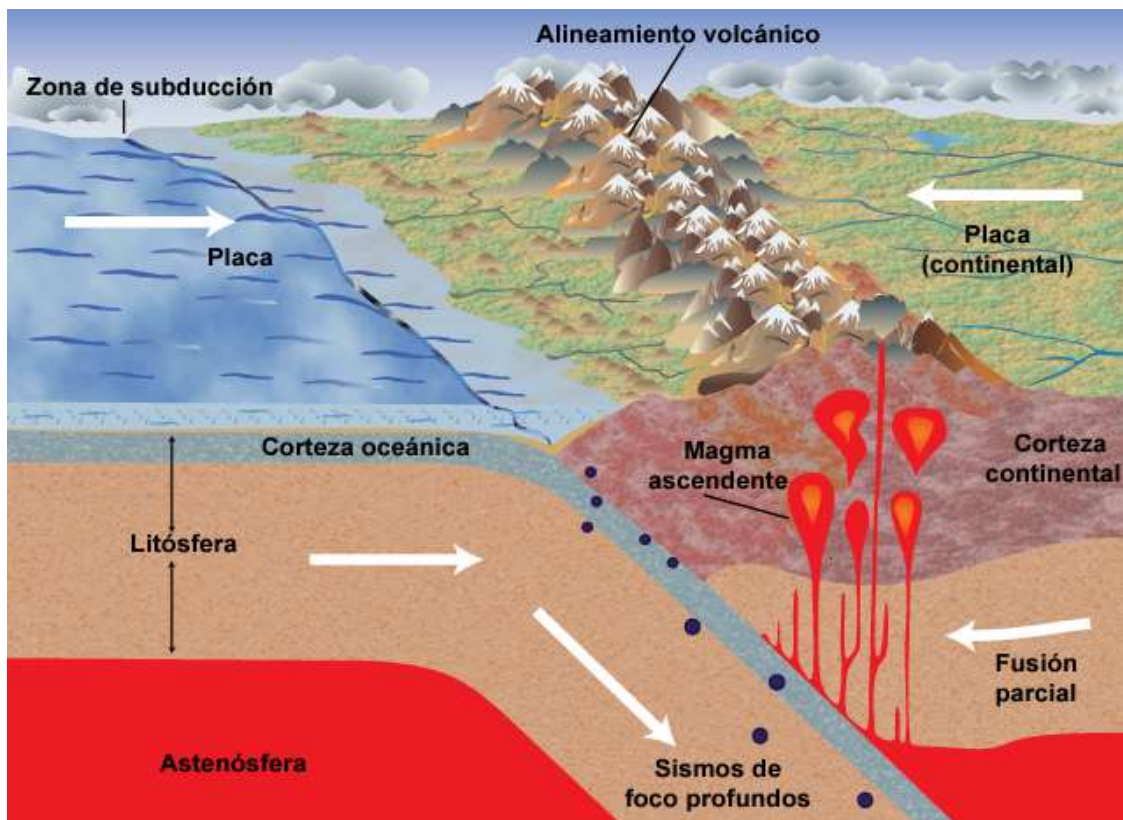
1.2.1 Subducción placa de Nazca y Sudamericana.

La subducción es un proceso geológico en el cual una placa tectónica se desplaza bajo otra, descendiendo hacia las capas más profundas de la Tierra en las zonas de convergencia de las placas. Esto ocurre en los límites de las placas tectónicas donde una placa oceánica más densa se introduce por debajo de una placa continental u oceánica. A medida que la placa subducida se sumerge en el manto terrestre, se produce una zona de subducción que puede dar

lugar a diversos fenómenos geológicos, como la formación de cordilleras montañosas, vulcanismo y actividad sísmica significativa.

En una zona de subducción, el lecho marino se hunde y cae dentro de la tierra. La presión entre estas placas puede dar lugar a la formación de grandes cadenas montañosas como sucede en la zona de subducción paralela a la cordillera de los Andes (Folguera & Spagnuolo, 2010).

Figura 3. Zona de subducción.



Nota: Tomado de “De la Tierra y los planetas rocosos. Una introducción a la tectónica”, por A. Folguera y M. Spagnuolo, 2010, Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación, p. 43. Tecnológica. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/104861>

La sismicidad se refiere a la actividad sísmica o la ocurrencia de temblores y terremotos en una región geográfica específica. Este fenómeno se debe a la liberación de energía acumulada en la corteza terrestre debido a la interacción de las placas tectónicas.

Ecuador es muy propenso a los sismos debido a que se encuentra en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, cuya interacción a lo largo de la historia ha generado la presentación de eventos sísmicos importantes. Collot et al. (2009) explican que, debido al movimiento convergente de la placa de Nazca con la placa

Sudamericana, la cual se mueve entre 5.5 y 5.8 cm por año, la placa de Nazca se dobla y es subducida bajo la placa Sudamericana, esto ha dado origen a la cordillera de los Andes y produce continuamente movimientos sísmicos y volcanismo.

Figura 4. Mapa estructural en la zona de subducción de la placa de Nazca y la 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), p. 2. https://www.academia.edu/35665522/Geologia_y_Geofisica_Marina_y_Terrestre_del_Ecuador

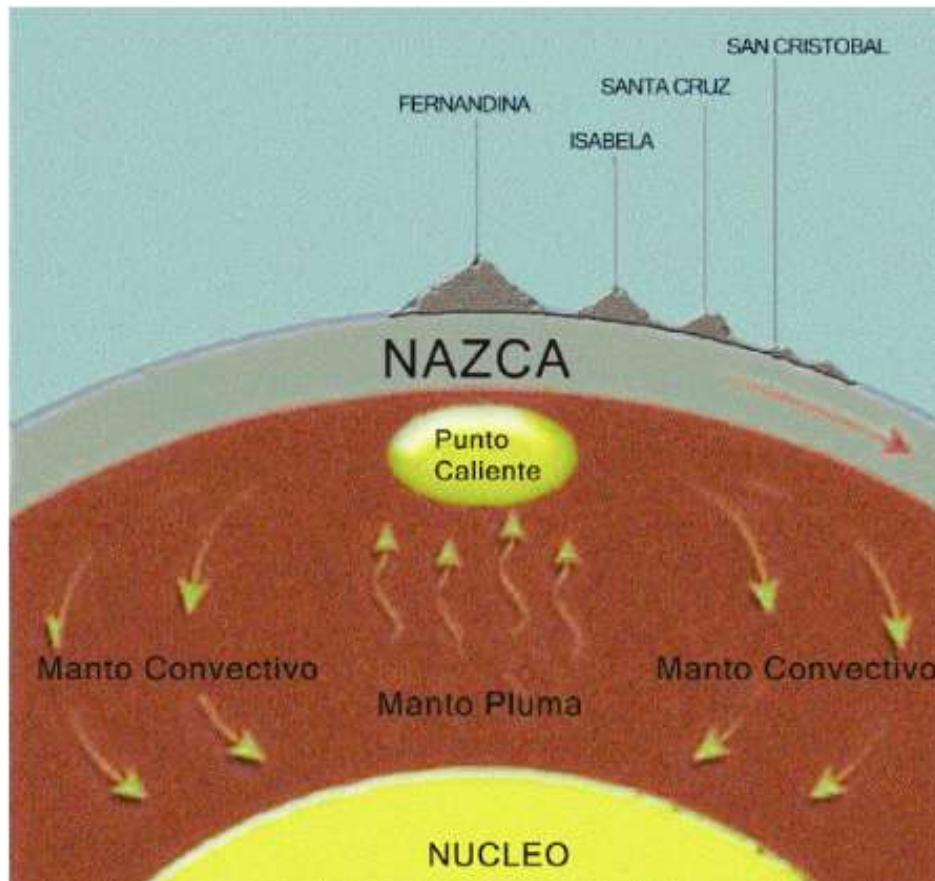
1.2.2 Punto caliente de las Galápagos.

Un punto caliente es un área fija en la Tierra donde el magma caliente del manto terrestre asciende hacia la superficie, generando actividad volcánica. A diferencia de los límites de placas, donde las placas tectónicas interactúan y generan actividad volcánica, los puntos calientes son fuentes estacionarias de magma. A medida que la placa tectónica se mueve sobre el punto caliente, se forman volcanes, creando a menudo una cadena de islas volcánicas. El

punto caliente de las Galápagos es un ejemplo de un área donde un punto caliente ha dado lugar a la formación de islas volcánicas a lo largo del tiempo.

Clausen (2016) comentó que en períodos pasados se pudo identificar la presencia de un punto caliente bajo la placa de Nazca, y formó la cordillera submarina de Carnegie.

Figura 5. *Punto caliente de las Galápagos.*



Nota: Tomado de “Cuevas volcánicas y otras atracciones espeleológicas”, por G. Gallardo y T. Toulkeridis, 2008, Centro de geología, volcanología y geodinámica (CGVG). https://www.researchgate.net/publication/280331411_CUEVAS_VOLCANICAS_Y_OTRAS_ATRACCIONES_ESPELEOLOGICAS_VOLCANIC_CAVES_AND_OTHER_SPEELOGICAL_ATTRACTIONS_Santa_Cruz_-_Galapagos

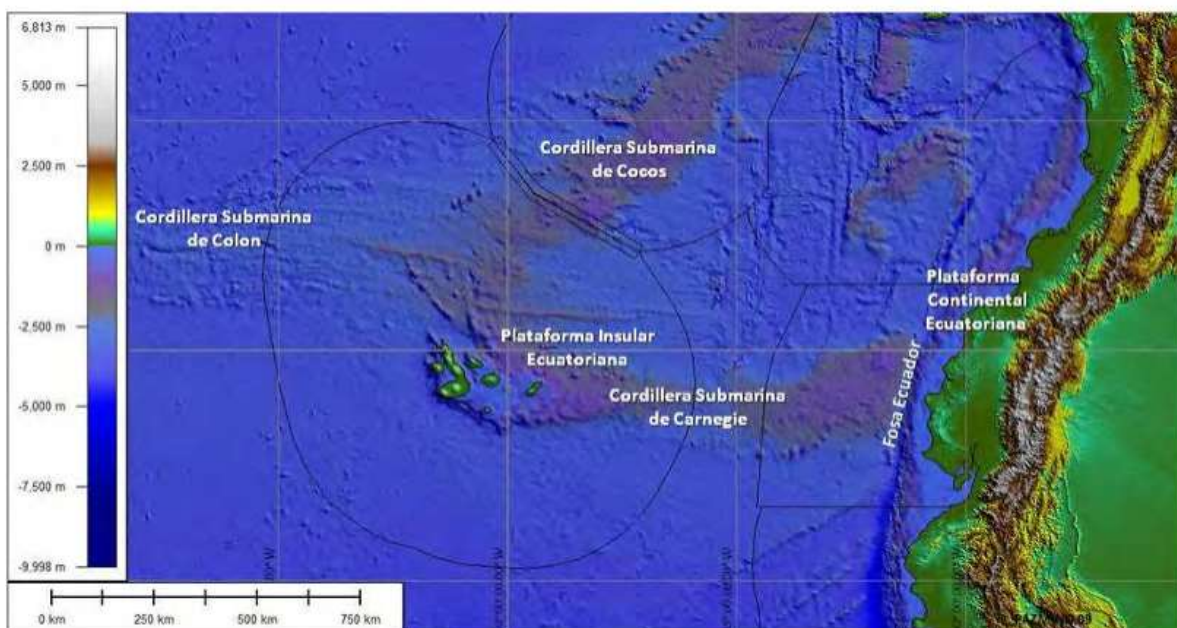
1.2.3 Cordillera submarina de Carnegie.

La cordillera de Carnegie es una cadena montañosa submarina ubicada sobre la placa de Nazca y se desplaza con una velocidad aproximada de 6 cm por año en dirección este-oeste respecto de la placa sudamericana (Michaud et al., 2006).

La cordillera submarina de Carnegie se encuentra ubicada, geográficamente, en la provincia de Galápagos, con una extensión de 282 km de sur a norte y 1045 km de este a oeste, con un área aproximada de 325 km cuadrados (Pazmiño & Michaud, 2009).

Collot et al. (2009) explican que la fosa de Ecuador tiene profundidades sobre 5000 metros frente al Golfo de Guayaquil, pero la misma llega a disminuir hasta los 2000 metros hacia el norte por efecto de la subducción de la cordillera de Carnegie. En la Figura 6 se puede observar la diferencia de niveles en la fosa de Ecuador debido a la cordillera de Carnegie.

Figura 6. Fondos y límites marinos del Ecuador: Características morfológicas de la plataforma ecuatoriana.



Nota: Tomado de “Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador”, por J. Collot et al., 2009, Comisión Nacional del Derecho del Mar (CNDM), p. 77. https://www.academia.edu/35665522/Geologia_y_Geofisica_Marina_y_Terrestre_del_Ecuador

1.2.4 Golfo de Guayaquil.

La formación del Golfo de Guayaquil tuvo lugar cuando la cordillera Carnegie chocó con los terrenos alóctonos, que se constituyen en el sustrato de la costa ecuatoriana, lo que ocasionó un desplazamiento hacia el noreste. Este fenómeno provocó un movimiento regional de traslado dextral transcurrente y una extensión en la región sur (Cobos & Montenegro, 2010).

Figura 7. Golfo de Guayaquil.



Nota: Tomado de “*Estudio integrado del Golfo de Guayaquil del Mioceno al Reciente*”, por L. Cobos y G. Montenegro, 2010, <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/10658>

1.2.5 Megafalla Guayaquil – Dolores.

La mayor parte del territorio ecuatoriano está atravesada por diversos conjuntos de fallas geológicas, siendo algunas más propensas a la actividad sísmica que otras. Esta variabilidad contribuye a que ciertas áreas del país experimenten mayor actividad sísmica en comparación con otras.

La Dolores – Guayaquil es una megacizalla que se extiende desde el golfo de Guayaquil en el suroeste de Ecuador, a través de Colombia, hasta Dolores en Venezuela. Este sistema de falla presenta diversos estados de deformación en el golfo de Guayaquil, de rumbo dextral a lo largo de la falla de Pallatanga y de la falla Chingual. En el golfo de Guayaquil la falla se conecta con la zona de subducción de la fosa oceánica del Ecuador (Yangari, 2019).

Figura 8. Zona de megafalla Guayaquil – Dolores.



Nota: Tomado de “Cualificación y cuantificación de fallas geológicas en el Distrito Metropolitano de Quito”, por A. Acosta et al., 2016, https://www.researchgate.net/publication/317017586_CUALIFICACION_Y_CUANTIFICACION_DE_FALLAS_GEOLOGICAS_EN_EL_DISTRITO_METROPOLITANO_DE_QUITO

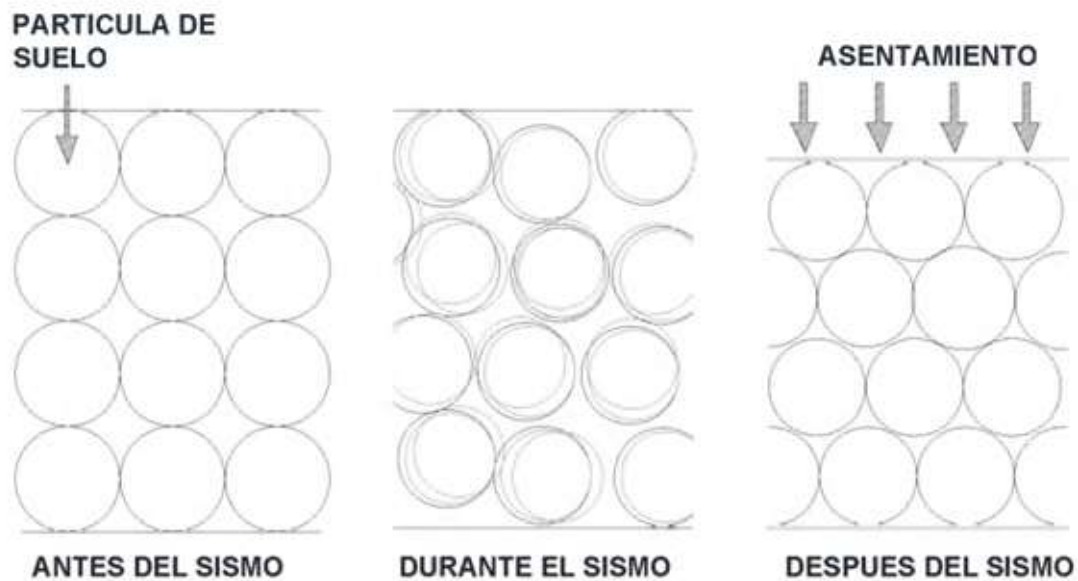
1.3 Licuación de suelos.

Según (Sánchez, 2013) la licuación es el proceso que conduce a la pérdida de firmeza o rigidez del suelo durante los terremotos, este proceso está principalmente, pero no exclusivamente, asociado con suelos saturados poco cohesivos. Por ende, el término licuación incluye todos los fenómenos donde se dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones de suelos saturados poco cohesivos.

El Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015) dice que la licuefacción ocurre debido a la excitación sísmica, que provoca un aumento en la presión de los poros y conduce a una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante.

Bravo (2016) explica que la disminución de la resistencia al esfuerzo cortante se manifiesta cuando los suelos granulares intentan reducir su volumen debido a la reorganización de partículas durante un evento sísmico. En ausencia de un sistema de drenaje adecuado, la presión de poros tiende a aumentar. Cuando la presión de poros alcanza el valor del esfuerzo total del suelo, el resultado es un esfuerzo efectivo en el suelo que se reduce a cero, lo que implica la pérdida de su capacidad para resistir esfuerzos cortantes.

Figura 9. Reordenamiento de partículas y asentamientos de suelo durante la ocurrencia de un sismo.



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, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, p. 19. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5372>

Durante el fenómeno de licuación los suelos no cohesivos sueltos (generalmente de densidad relativa $D_r < 35\%$), se contraen al ser sometidos a vibraciones súbitas, permitiendo la generación de la licuación con grandes niveles de deformación. Los suelos densos (generalmente de densidad relativa $D_r > 65\%$) no son licuables porque se dilatan al ser sometidos a vibraciones súbitas en presencia del agua, sin embargo, existen excepciones dependiendo del nivel sísmico, condición topográfica de la superficie del terreno y esfuerzo estático inducido previo al sismo. Los suelos pobremente confinados son más fáciles de licuar debido a que la presión de confinamiento del suelo se incrementa con la profundidad, por ello los suelos superficiales serán más fáciles de licuar que los profundos (Bravo, 2016).

En determinadas circunstancias, es posible que se desarrollen en la superficie montículos de arena, como se muestra en la Figura 10. La presión de las fuerzas sísmicas impulsa el agua de los poros hacia la superficie del suelo a través de los espacios intergranulares entre las partículas, lo que resulta en un aumento de la presión de poros.

Figura 10. Flotación y ahuellamiento de depósitos de arena en licuación.



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, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, p. 19. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5372>

1.4 Suelos tipo F.

En la sección dedicada al Peligro Sísmico (Diseño Sismo Resistente) de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS, se encuentra la Tabla 1 que presenta la categorización de perfiles de suelo para el diseño y construcción de estructuras civiles. Esta tabla comprende seis tipos distintos de perfiles de suelo, cada uno acompañado de sus parámetros característicos correspondientes. La normativa establece que, para llevar a cabo una clasificación precisa del perfil de suelo, es necesario realizar estudios geotécnicos que alcancen como mínimo los primeros 30 metros de profundidad. Esto permite caracterizar los estratos presentes en la zona de estudio y, posteriormente, clasificar los perfiles. Los parámetros empleados para la estimación varían según el caso e incluyen: la velocidad de onda de corte (V_s), el número de golpes del ensayo SPT (N), la resistencia al corte no drenado (S_u), el índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de humedad del suelo (w).

La clasificación del tipo de suelo inicia con la evaluación de si el sitio no se define como suelo tipo F. A partir de ahí, se procede a descartar las categorías inferiores, comenzando por el tipo E, seguido por el tipo D, tipo C, tipo B y, finalmente, tipo A.

Tabla 1. Clasificación de los perfiles del suelo.

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$V_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media.	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50$ $S_u \geq 100 \text{ kPa}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$50 > N \geq 15$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa}$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 - Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 - Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m)	
	F3 - Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5m con Índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4 - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5 - Suelos con contrastes de impedancia ocurriendo dentro de los primeros 30m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
F6 - Rellenos colocados sin control ingenieril.		

Nota: Adaptado de “NEC-SE-DS. Norma Ecuatoriana de la Construcción - Peligro Sísmico (Diseño Sismo Resistente)”, por Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015), <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Los suelos tipo F son considerados casos especiales y representan los terrenos más desafiantes para proyectos de construcción. Su problemática se deriva de su naturaleza blanda, débilmente cementada, poco rígida y con cierto contenido de materia orgánica. La normativa NEC-SE-DS (2015) subraya la singularidad de estos suelos y recomienda que las campañas de exploración geotécnica no se limiten exclusivamente a los primeros 30 metros de profundidad cuando se trata de suelos tipo F y también destaca la importancia de llevar a cabo

investigaciones exhaustivas y modelamientos dinámicos de respuestas de sitio para obtener una comprensión más completa de la complejidad de estos suelos.

La categoría de suelos tipo F se divide en 6 subcategorías cada una con sus características propias que los definen. En la Figura 1 se puede observar el estudio de microzonificación sísmica y geotécnica en el cual se realizaron perforaciones y mediciones geofísicas a lo largo de la zona deltaica estuarina, Bravo (2016) comenta que se hallaron los siguientes geomateriales: arcillas limosas gris verdosas con diatomeas y presencia de un cementante desarrollado en ambiente anóxico (pirita), capas de arenas limosas y esporádicos bancos de arena con restos de conchas . A partir de este estudio junto con un análisis de la norma, el autor concluye que existe una combinación de suelo F1 y F4 en el complejo deltaico estuarino analizado, es decir que se deberán tomar en consideración el proceso de consolidación para las arcillas blandas, y el potencial de licuación para los estratos arenosos – limosos.

CAPITULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.1 Columnas de piedra.

La metodología de las columnas de piedra, también denominadas columnas de grava, constituye un enfoque destacado para el mejoramiento de suelos blandos. Esta técnica implica la realización de perforaciones verticales en el terreno, las cuales son posteriormente rellenas con grava y meticulosamente compactadas mediante vibración. Su origen remonta a finales de los años treinta y surgió como una solución innovadora al intentar aplicar la técnica clásica de vibrocompactación, también conocida como vibroflotación, en suelos cohesivos.

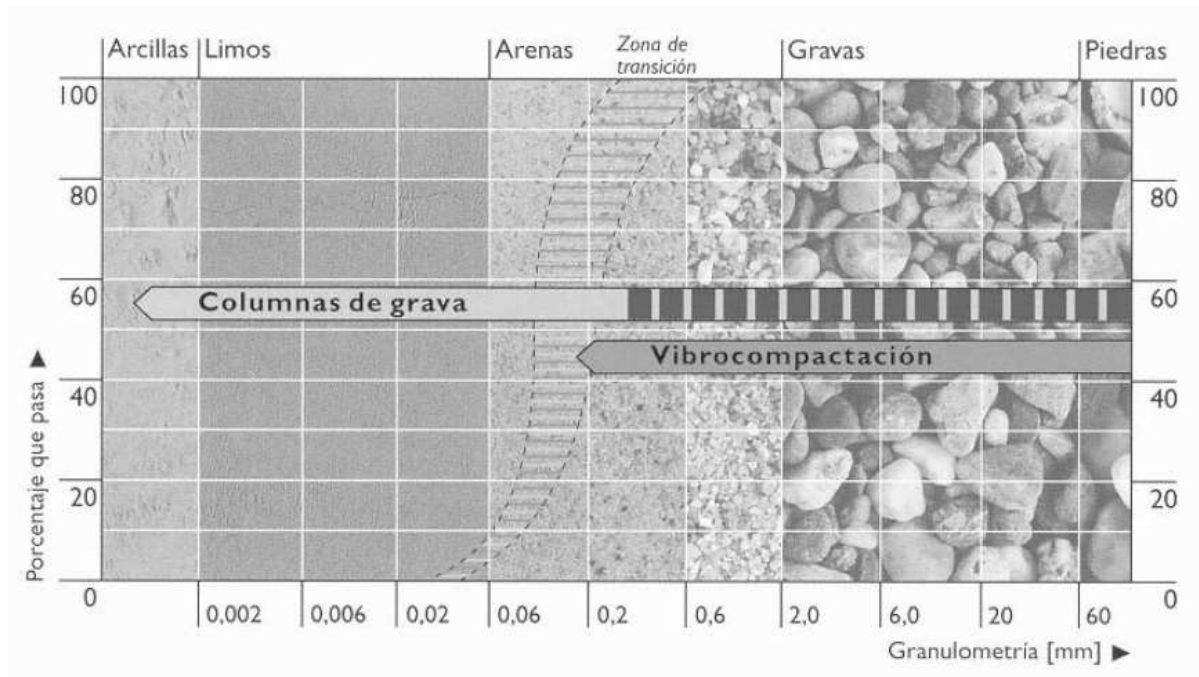
La vibrocompactación es una técnica muy utilizada en el mejoramiento del terreno, consiste en la compactación del suelo mediante la inserción de un vibrador hasta alcanzar la profundidad de tratamiento requerida. Este método demuestra su eficacia especialmente en suelos granulares, donde las partículas tienden a ajustarse de manera más favorable bajo la influencia de las vibraciones generadas. Estas vibraciones agitan y reorganizan las partículas, disminuyendo los espacios vacíos y, en consecuencia, elevando la densidad del suelo.

Sin embargo, en suelos cohesivos, esta técnica encuentra limitaciones sustanciales debido a la incapacidad de estos suelos para densificarse mediante la acción del vibrador, Castro (2008) explica que "la cohesión e impermeabilidad del terreno no permite el reordenamiento instantáneo de las partículas en configuraciones más densas" (p. 53), lo que conduce a la formación de perforaciones verticales en el punto de inserción del vibrador.

En respuesta a este problema surge la técnica de las columnas de piedra, en este método se utiliza la grava para rellenar en sentido ascendente las perforaciones producidas en los suelos cohesivos y luego estas piedras son compactadas por la acción del vibrador, resultando en la formación de una columna de piedra, o de grava, en cada uno de los puntos tratados con dicho material.

Es así que la elección entre la vibrocompactación y las columnas de piedra depende de las características específicas del terreno a mejorar, especialmente de su granulometría. En la Figura 11, se presenta un criterio ampliamente utilizado para seleccionar el método más adecuado según la granulometría del suelo.

Figura 11. Criterio de adecuación de suelos por vibrocompactación según granulometría.



Nota: Tomado de “Columnas de gravas”, por V. Yepes, 2019, El blog de Víctor Yepes, <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/06/18/columnas-de-gravas/>

Las columnas de piedra han desempeñado un papel fundamental, principalmente, en el refuerzo de terraplenes para aumentar su capacidad y mejorar significativamente la estabilidad de sus taludes. No obstante, su uso se extiende a diversas aplicaciones desde su empleo, como cimentación para edificaciones, contribuyendo a distribuir cargas y minimizar asentamientos diferenciales, hasta su utilización en estructuras marítimas como muelles y plataformas. En este contexto, las columnas de piedra se convierten en un elemento clave para fortalecer la resistencia del suelo y reducir la sedimentación. La diversidad de aplicaciones de esta técnica radica en la variabilidad de las características que pueden ser mejoradas mediante su implementación.

El tratamiento de suelos blandos con columnas de grava se realiza con el propósito de obtener una o varias mejoras específicas. Estas mejoras incluyen la reducción de asentos, la aceleración del proceso de consolidación, el aumento de la capacidad portante del suelo, la mejora de la estabilidad frente a deslizamientos y la disminución de la posibilidad de licuefacción del suelo (Cimentada, 2009).

2.1.1 Métodos constructivos.

De manera general, se reconocen dos métodos predominantes para la edificación de columnas de piedra: la vibrosustitución y el vibrodesplazamiento. Ambos métodos presentan tanto ventajas como desventajas en comparación con el otro, y la elección del procedimiento específico a implementar depende en gran medida de las características y requisitos particulares de cada proyecto.

La vibrosustitución, también conocida como vía húmeda, utiliza agua a presión como un recurso eficiente para facilitar la penetración en el terreno. Durante este proceso, el agua, expulsada desde la punta del vibrador, se combina con el peso y la vibración generados por el dispositivo para avanzar en el suelo. Esta combinación entre la fuerza del agua a presión y la vibración no solo posibilita la penetración, sino que, además, desplaza el suelo hacia el exterior, generando una perforación con un diámetro mayor que el del vibrador.

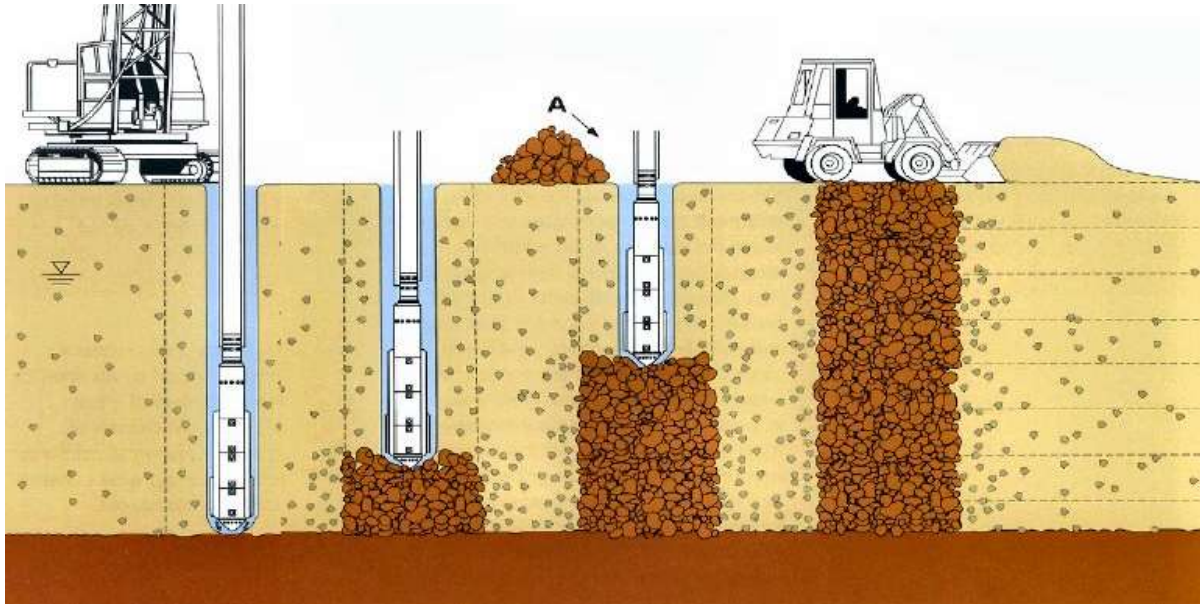
Al haber alcanzado la profundidad requerida mediante esta perforación asistida por agua, se inicia el siguiente paso: rellenar la cavidad con piedra y compactarla en secciones de aproximadamente 50 centímetros en cada fase hasta llegar a la superficie. Este proceso culmina con la formación de una columna de piedra, consolidando así de manera efectiva la mejora del suelo.

Este método se prefiere especialmente cuando el sitio está compuesto por suelos extremadamente blandos, que carecen de la capacidad para mantenerse por sí mismos en una perforación sin soporte. Además, se elige esta técnica cuando el nivel freático se encuentra en un nivel elevado. La presencia de suelos altamente blandos representa un desafío significativo, ya que estos suelos no tienen la resistencia suficiente para mantener la integridad del agujero sin algún tipo de soporte. En tales condiciones, la vibrosustitución se convierte en una estrategia efectiva para proporcionar el necesario soporte y facilitar el proceso de mejora del suelo. La consideración del nivel freático elevado también es crucial, ya que puede afectar la estabilidad del agujero y la eficacia del método de construcción de columnas de piedra.

Este método presenta también ciertas desventajas, siendo dos de los más prominentes la notable demanda de agua y la gestión de los lodos generados durante el proceso. En primer lugar, la cantidad sustancial de agua requerida para llevar a cabo este método implica la necesidad de asegurar un suministro abundante para su ejecución. Además, se plantea un desafío adicional en términos de gestionar eficazmente tanto el agua utilizada como los lodos generados durante la instalación de las columnas. Este aspecto no solo involucra la disposición

adecuada de los lodos, sino también la implementación de un sistema de gestión integral del agua empleado en el proceso. Por último, la inundación de la plataforma de trabajo representa otra complicación, ya que requiere un tratamiento cuidadoso para su restitución final y el retorno a condiciones adecuadas para futuras etapas del proyecto.

Figura 12. Esquema de construcción por vibrosustitución.



Nota: Tomado de “*Ground Improvement using Vibro Replacement in ASIA 1994 to 2004*”, por V. Raju et al., 2004, 5th International Conference on ground improvement techniques, p. 4. <https://docplayer.net/35122545-Ground-improvement-using-vibro-replacement-in-asia-1994-to-2004.html>

El vibrodesplazamiento, también reconocido como vía seca, se adentra en el terreno siguiendo un procedimiento que guarda similitud con la vibrosustitución, pero se diferencia por la utilización de aire comprimido en la punta del vibrador como medio para facilitar la penetración. En este método, el aire, al desplazarse lateralmente con fuerza controlada, genera una perforación hasta alcanzar la profundidad específica requerida.

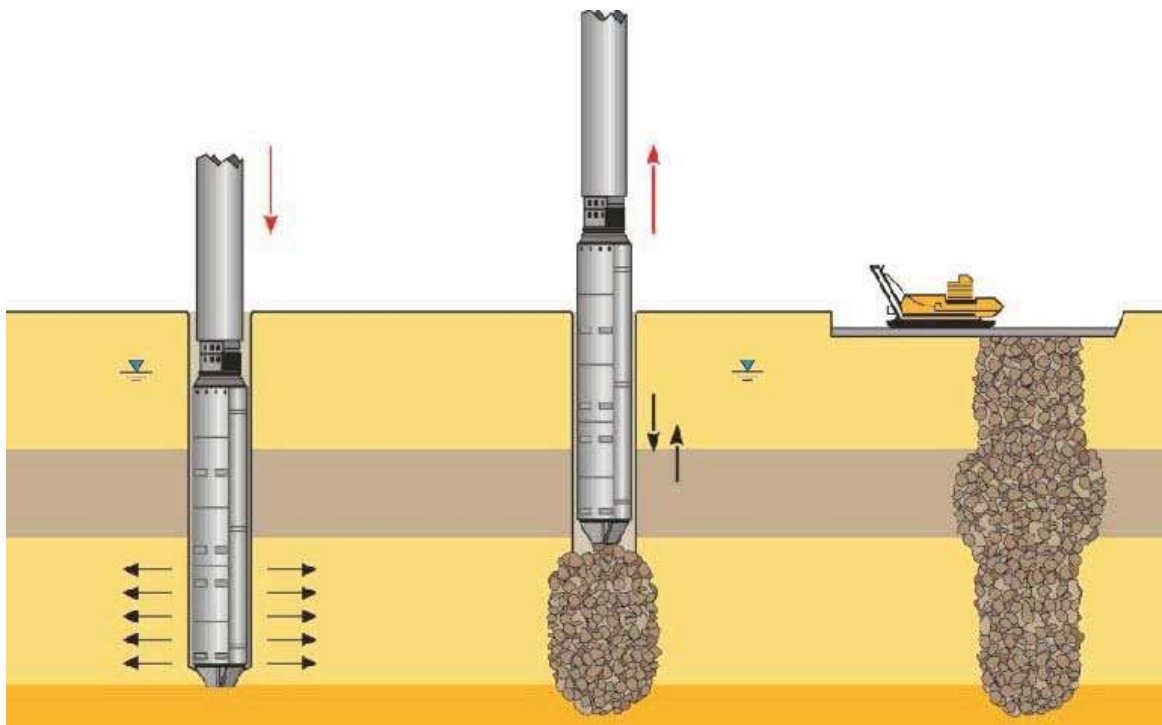
La cavidad resultante, formada mediante este desplazamiento asistido por aire, se procede a llenar meticulosamente con piedra, aplicando el mismo principio de compactación en capas sucesivas de aproximadamente 50 centímetros a medida que se eleva hacia la superficie. Este proceso continuo culmina con la consolidación de columnas de piedra.

Es un proceso mucho más limpio que la vibrosustitución debido a que no realiza el proceso de inyección de agua. Este aspecto lo convierte en una opción más sostenible y amigable con el medio ambiente, ya que no implica la gestión de grandes cantidades de agua

ni la disposición de lodos generados durante el proceso. Además, al no utilizar agua, se reduce la posibilidad de impactos negativos en las condiciones locales del nivel freático.

Aunque el vibrodesplazamiento suele resultar más económico que la vía húmeda, se debe evaluar las condiciones del sitio para asegurar que el suelo no vaya a presentar problemas de colapso. La vía seca es especialmente recomendable en suelos parcialmente saturados que pueden mantenerse sin soporte, especialmente aquellos que tienden a densificarse por la acción de la vibración lateral. La elección entre la vía húmeda y la vía seca dependerá de consideraciones específicas del proyecto, como la naturaleza del suelo, la disponibilidad de agua y las preocupaciones ambientales locales.

Figura 13. Esquema de construcción por vibrodesplazamiento.

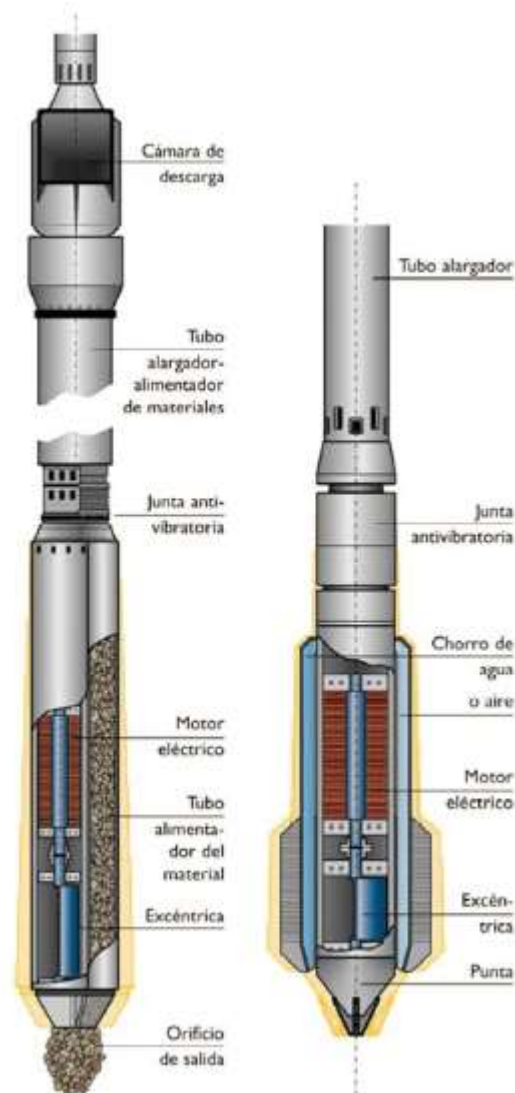


Nota: Tomado de “*Ground Improvement using Vibro Replacement in ASIA 1994 to 2004*”, por V. Raju et al., 2004, 5th International Conference on ground improvement techniques, p. 5. <https://docplayer.net/35122545-Ground-improvement-using-vibro-replacement-in-asia-1994-to-2004.html>

En la actualidad, se ha implementado un método eficiente para la construcción de columnas de piedra, utilizando vibradores con alimentación por fondo, también conocido como "bottom feed". Este sistema permite la introducción directa de la piedra en el vibrador, que a su vez suministra la piedra desde la punta del dispositivo. Este enfoque fue desarrollado con el propósito de superar limitaciones asociadas a la alimentación por superficie, utilizando una

pala cargadora para abastecer grava a una tolva en el mástil-guía del vibrador. La tolva asciende, depositando la grava en una cámara de descarga en la parte superior, y luego se conduce por el tubo-vibrador hasta la punta del vibrador, logrando así un aporte directo en el fondo del suelo. Este método combina eficiencia y superación de inconvenientes, mejorando la ejecución de las columnas de piedra.

Figura 14. Vibradores para alimentación por fondo, *bottom feed*, (izquierda) y en superficie, *top feed*, (derecha).



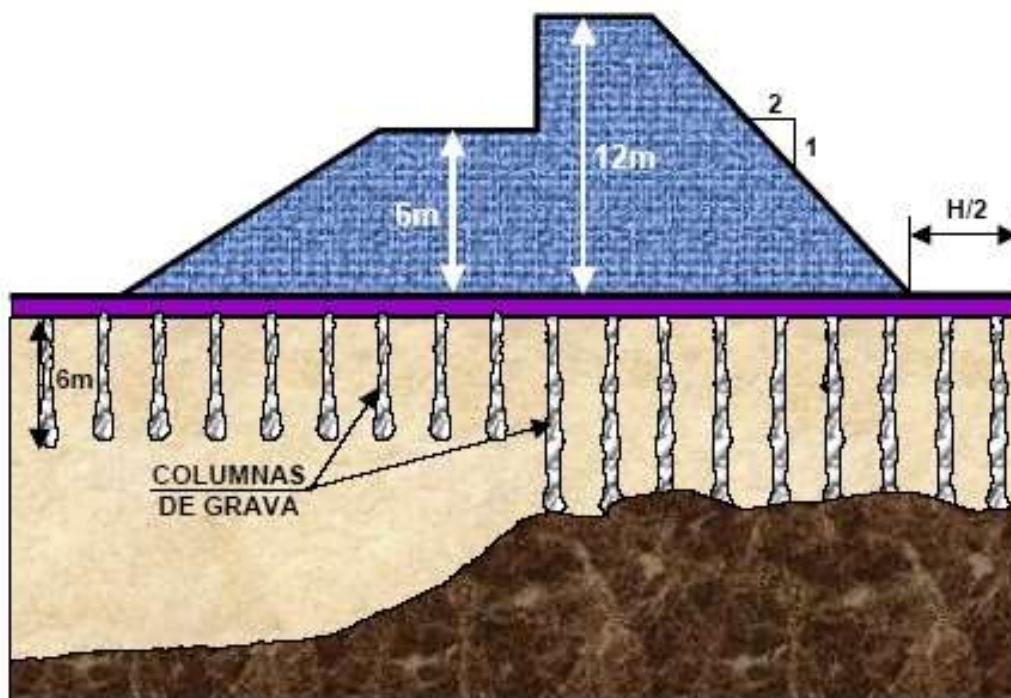
Nota: Tomado de “Ground Improvement using Vibro Replacement in ASIA 1994 to 2004”, por V. Raju et al., 2004, 5th International Conference on ground improvement techniques, p. 3. <https://docplayer.net/35122545-Ground-improvement-using-vibro-replacement-in-asia-1994-to-2004.html>

2.1.2 Dimensiones y proceso constructivo.

La perforación de las columnas de grava hasta la profundidad requerida se realiza por medio de la vía seca o la vía húmeda. Estos métodos ofrecen flexibilidad en términos de diseño y dimensiones de las columnas, permitiendo adaptarse a las condiciones específicas de cada proyecto. El tamaño de las columnas puede variar según las características del suelo y los requisitos del proyecto, brindando a los ingenieros la capacidad de personalizar la solución para abordar las necesidades particulares del sitio.

La extensión de las columnas hasta alcanzar un estrato resistente es una consideración esencial en el proceso constructivo. La preferencia general recae en asegurar que la columna penetre hasta un estrato que brinde una base sólida y resistente. Al llegar a un estrato resistente, se busca reducir de manera significativa la posibilidad de asentamientos profundos en la base de la columna de piedra. Este enfoque no solo contribuye a la estabilidad inmediata de las columnas, sino que también mitiga riesgos potenciales a largo plazo, fortaleciendo la capacidad de carga del suelo y mejorando la eficacia general del método de construcción.

Figura 15. Tratamiento del terreno con columnas de grava, en función de la altura del terraplén.



Nota: Tomado de “Filosofía del diseño y ejecución de terraplenes y su patología (II)”, por C. Oteo, 2011, Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras, p. 12. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/301434>

Es importante destacar, como se observa en la Figura 15, que la decisión de llegar a un estrato resistente no es obligatoria y debe basarse en una evaluación detallada de las condiciones del suelo y los objetivos específicos del proyecto. Este enfoque personalizado garantiza que las columnas de grava no solo cumplan con los requisitos de carga y estabilidad, sino que también proporcionen una solución duradera y eficiente para el mejoramiento del suelo en el sitio.

La granulometría de las piedras empleadas en las columnas de grava se adapta a diversas variables, entre ellas la disponibilidad de agregados en las proximidades del proyecto, las condiciones específicas del terreno donde se llevará a cabo la construcción y las preferencias del contratista. De acuerdo con las recomendaciones de Barksdale y Bachus (1983), la elección óptima y comúnmente adoptada por los constructores es utilizar piedras con diámetros comprendidos entre 12 y 75 milímetros para la construcción de columnas mediante la vibrosustitución, mientras que para el vibrodesplazamiento se suele utilizar piedras de 100 milímetros de diámetro mediante top feed. En la mayoría de los casos, se da preferencia a la piedra triturada, aunque también se emplea grava natural en ciertas circunstancias. Este enfoque permite adaptarse a las condiciones locales y garantizar un rendimiento eficaz de las columnas de grava en función de los requisitos específicos del proyecto.

Tanto si se utilizan piedras de un solo diámetro como si se trata de agregados graduados, el contratista cuenta con la capacidad de modificar el enfoque constructivo de manera estratégica. En situaciones donde se emplean piedras de un solo diámetro, el procedimiento puede adaptarse para aprovechar las características específicas de estas piedras uniformes, optimizando así el proceso de instalación y compactación. Por otro lado, cuando se utilizan agregados graduados, el contratista puede ajustar el método constructivo para garantizar una distribución eficiente de las diferentes fracciones de piedra, maximizando la eficacia de la mejora del suelo.

En cuanto al diámetro de las columnas de grava, este aspecto es de gran relevancia y se adapta a las características del suelo en cuestión. Por lo general, se observa una variación en los diámetros que va desde 0,5 hasta 1,2 metros, siendo esta amplitud determinada por la deformabilidad específica del suelo donde se implementará el proyecto. No obstante, las dimensiones más frecuentemente utilizadas se sitúan en un rango de 0,8 a 1,0 metros.

Es importante destacar que la elección del método constructivo también desempeña un papel crucial en la determinación del diámetro resultante de las columnas de grava. Como

indican Magnan et al. (2005), la construcción de columnas por vía húmeda tiende a generar diámetros ligeramente superiores en comparación con la vía seca. Esta influencia del método constructivo sobre las dimensiones finales resalta la importancia de evaluar cuidadosamente las condiciones del sitio y seleccionar el enfoque constructivo más adecuado según las necesidades y características específicas del proyecto. El ajuste del diámetro contribuye significativamente a la eficacia y estabilidad de las columnas de grava durante su vida útil.

Para garantizar la adecuada densificación de las piedras en las columnas de grava, es una práctica común basarse en el consumo de energía utilizado para compactar el suelo. Este control se lleva a cabo mediante el empleo de un amperímetro y un registrador automático, que monitorean de manera continua el consumo energético a lo largo de la construcción de las columnas de piedra. Sin embargo, es crucial señalar que este enfoque solo asegura el contacto efectivo entre las piedras y el vibrador, sin garantizar necesariamente la correcta interacción entre los agregados.

En este sentido, se destaca la importancia de complementar la monitorización del consumo energético con la inspección visual del proceso y los resultados obtenidos. La observación directa del desarrollo de las columnas de grava proporciona una visión detallada del comportamiento de los agregados y su interacción durante la compactación. Esta inspección visual permite evaluar de manera más completa la eficacia del procedimiento, identificando posibles áreas de mejora y asegurando que se alcancen los efectos deseados en términos de densificación y estabilización del suelo.

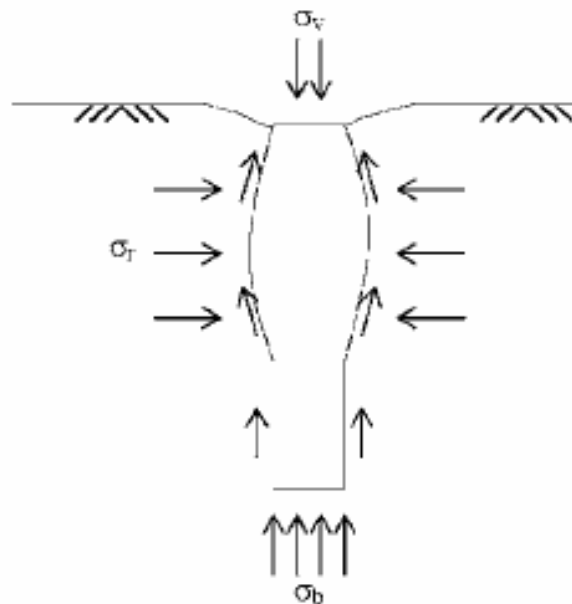
Debido al desplazamiento lateral de las piedras inducido por la vibración, el diámetro de la columna de piedra construida suele ser mayor que el orificio original creado por la penetración del vibrador. La variación en el diámetro de la columna en relación con el diámetro de la penetración depende de varios factores, como el tipo de suelo, su resistencia al corte no drenado, el tamaño del agregado, las características del vibrador utilizado y el método de construcción de la columna.

La estimación precisa del diámetro de la columna construida implica considerar estas variables de manera integral. Diversos enfoques matemáticos se emplean para realizar esta estimación, adaptándose a las particularidades de cada situación. Además, para obtener datos más específicos y ajustados al contexto del proyecto, se pueden llevar a cabo perforaciones de prueba en áreas adyacentes a las columnas de piedra construidas. Estas perforaciones

adicionales permiten evaluar el comportamiento del suelo de manera más detallada, contribuyendo a una estimación más precisa del diámetro final de las columnas.

Estos ensayos suelen evidenciar un perfil en el suelo en la ubicación de la columna, representado como una forma de zanahoria. Este perfil presenta un ensanchamiento concentrado en la parte superior de la columna, tal como se ilustra en la Figura 16.

Figura 16. Tensiones y deformación de las columnas de grava al ser cargadas.



Nota: Tomado de “*Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns*”, por J. Hughes y N. Withers, 1974, <https://www.geplus.co.uk/technical-paper/technical-paper-reinforcing-of-soft-cohesive-soils-with-stone-columns-01-05-1974/>

Una vez completada con éxito la construcción de una columna de grava, se inicia la edificación de las columnas adyacentes conforme al diseño establecido. Por lo general, se mantiene un espacio entre columnas que oscila entre 1,8 y 2,7 metros, aunque en ciertos casos, según el diseño específico, se pueden utilizar distancias menores. Como regla general, se aconseja un espaciamiento mínimo entre columnas de 1,5 metros para prevenir posibles complicaciones constructivas y garantizar la integridad del proyecto. Este cuidado en la distribución espacial de las columnas contribuye a una mejora más efectiva y uniforme de las características del suelo en toda la zona de intervención.

Las columnas de grava han demostrado ser una estrategia versátil y efectiva para el mejoramiento de suelos, abarcando desde el refuerzo de terraplenes hasta la cimentación de estructuras diversas. Sin embargo, es crucial reconocer que su aplicación óptima está

intrínsecamente ligada a las características específicas del terreno y los requisitos del proyecto. Las decisiones estratégicas, como la elección entre métodos constructivos, el dimensionamiento de las columnas y la evaluación detallada del suelo, son fundamentales para garantizar el éxito de esta técnica.

A medida que se ha avanzado en la comprensión de las limitaciones y desafíos asociados con las columnas de grava en diferentes tipos de suelos, se han llevado a cabo diversas investigaciones para superar estas restricciones. Estos esfuerzos han dado lugar al desarrollo de nuevas tecnologías y enfoques que buscan mejorar aún más la eficacia y la adaptabilidad de las columnas de grava en una variedad de contextos geotécnicos.

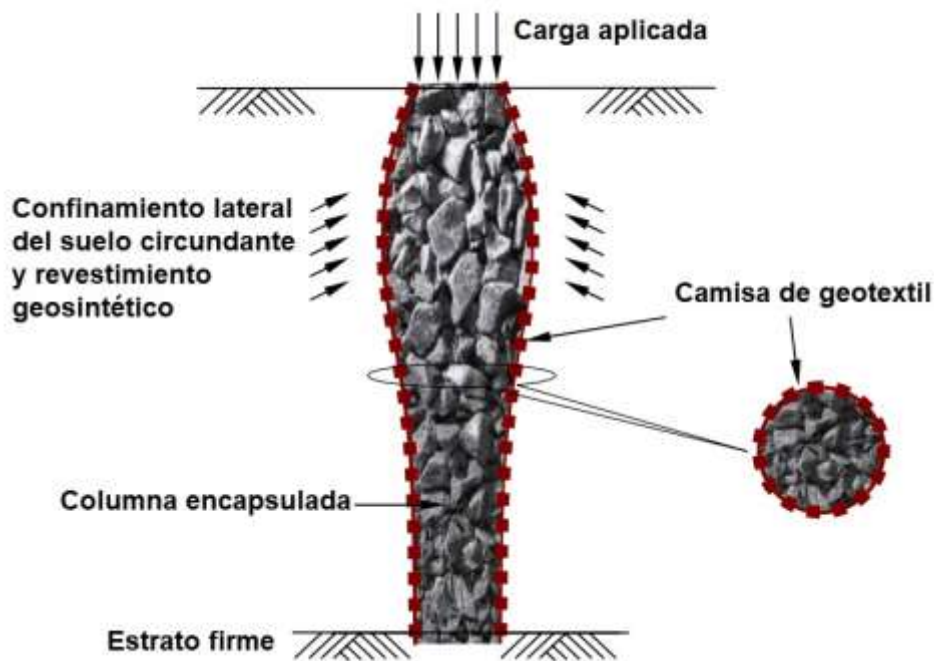
Entre los avances en este campo, destacan dos en particular, los cuales captan el interés en el contexto de esta tesis: las columnas de piedra recubiertas con geotextil y las columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento. Estas mejoras representan no solo un paso adelante en la ingeniería geotécnica, sino también soluciones específicas que serán analizadas con mayor detalle en el desarrollo de este trabajo.

2.2 Columnas de piedra reforzadas con geotextil.

En las columnas de piedra la activación de la carga vertical se produce gracias a la presión pasiva del suelo circundante. Sin embargo, en suelos extremadamente blandos, la falta de confinamiento lateral adecuado puede dar lugar a abultamientos excesivos, generando asentamientos inesperados en la superficie. En respuesta a este desafío, surgieron las columnas de piedra reforzadas con geotextil o columnas encapsuladas con geotextil (GEC, por sus siglas en inglés), las cuales no solo abordan de manera efectiva el problema de abultamiento en suelos blandos, sino que también introducen mejoras sustanciales en las columnas. Estas mejoras incluyen el aumento significativo de la capacidad de carga y la transformación de la columna en un elemento semirrígido que actúa como soporte final.

De acuerdo con Raithel et al. (2002), las columnas recubiertas con geotextil se destacan por su capacidad para ser empleadas eficazmente incluso en suelos extremadamente blandos. En contraste con las columnas sin recubrimiento, estas columnas no requieren que el soporte horizontal del suelo blando sea igual a la presión horizontal en la columna. El geotextil proporciona un soporte lateral significativo, lo que permite que el soporte horizontal del suelo blando sea considerablemente menor que la presión horizontal en la columna.

Figura 17. Esquema de columna encapsulada de piedra reforzada con geotextil.



Nota: Tomado de “*Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns*”, por S. Murugesan y K. Rajagopal, 2009, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (1),p. 130. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000187>

Por esta razón, se aconseja la aplicación de un revestimiento de geotextil en las columnas de piedra cuando se enfrenta la construcción en suelos extremadamente blandos. No obstante, esta recomendación no se limita exclusivamente a estas situaciones, ya que este revestimiento no solo ofrece beneficios en términos de estabilidad, sino que también acelera el proceso de consolidación del suelo en comparación con columnas no encapsuladas.

Según Alexview y Thomson (2014), las columnas encapsuladas con geotextil son particularmente efectivas en depósitos de suelos blandos con valores de resistencia al corte no drenado (S_u) inferiores a 30 kPa, mostrando una mayor eficacia en suelos con valores inferiores a 15 kPa. Este último umbral es crítico, ya que, por debajo de este valor, el suelo carece de la presión de confinamiento suficiente para garantizar la integridad de la columna en ausencia del revestimiento de geotextil. Además de proporcionar confinamiento adicional, las columnas encapsuladas con geotextil actúan como "mega-drenes", acelerando significativamente la consolidación primaria y los procesos de asentamiento. Los asentamientos posteriores a la construcción son generalmente mínimos, y los asentamientos diferenciales son prácticamente

inexistentes cuando la altura del terraplén supera la altura crítica, la cual se recomienda que sea de al menos 1.5 metros.

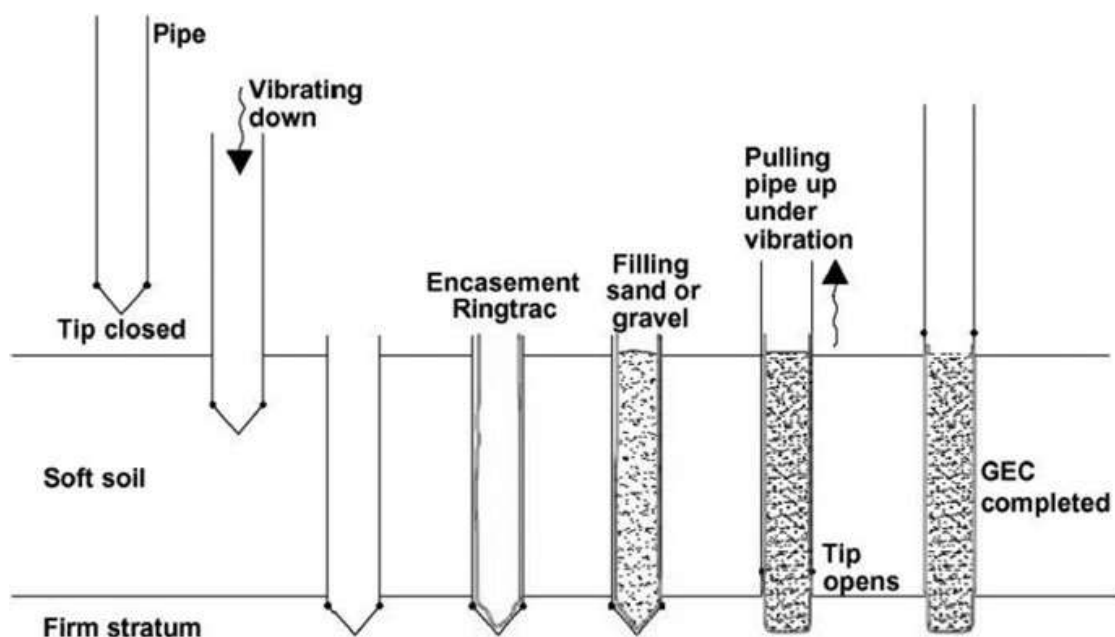
2.2.1 Métodos constructivos.

Las columnas encapsuladas ofrecen la posibilidad de ser instaladas con o sin desplazamiento lateral del suelo blando, y la elección entre estos enfoques técnicos conlleva la utilización de uno de los dos métodos comúnmente utilizados: el método por desplazamiento o el método de sustitución. Aunque existen casos particulares en los que métodos alternativos de construcción han sido utilizados, como el “*bottom feed*”, estos son menos frecuentes.

El método por desplazamiento es el más recomendado realizar para suelos muy blandos, generalmente para suelos con resistencia al corte no drenado “ S_u ” menor a 15 kPa. Este método sigue el procedimiento que se observa en la Figura 18.

En relación con las dimensiones características de las columnas encapsuladas con geotextil, Alexview et al. (2012) señalan que comúnmente presentan un diámetro de 0.80 metros, donde el diámetro del geotextil idealmente coincide con el diámetro interior del tubo. Además, el espaciado típico entre estas columnas oscila generalmente entre 1.5 y 2.5 metros.

Figura 18. Método por desplazamiento para la construcción de las columnas encapsuladas con geotextil.



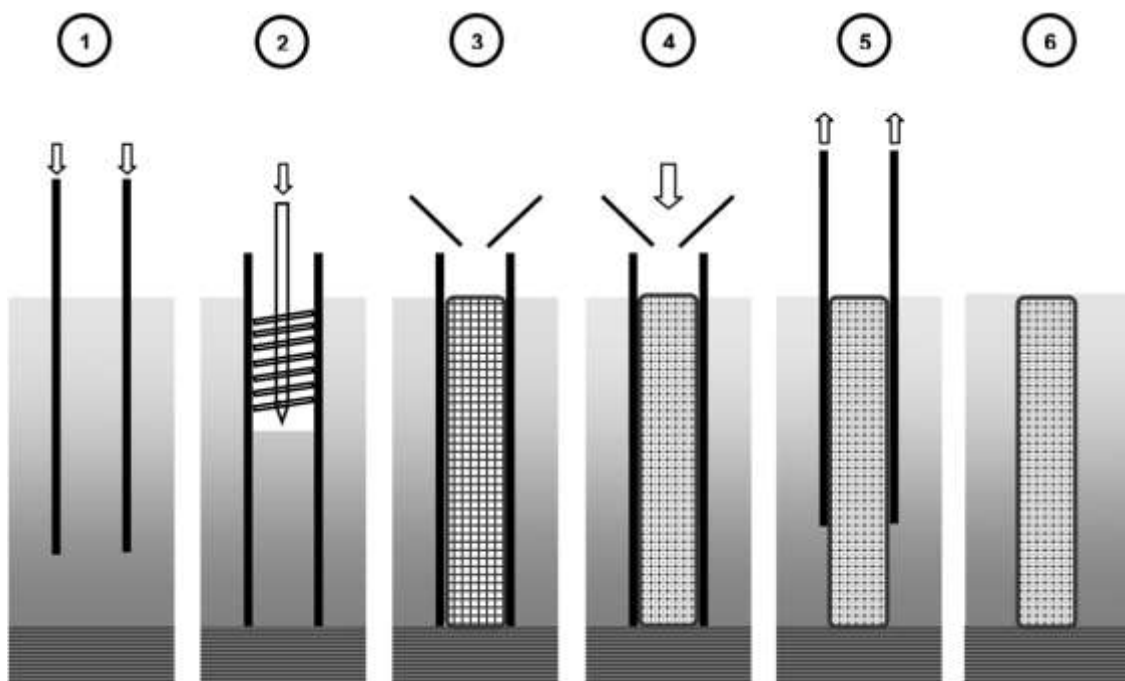
Nota: Tomado de “*Geotextile Encased Columns (GEC): Load Capacity, Geotextile Selection and Pre-Design Graphs*”, por Alexview et al., 2012, Contemporary Issues in Foundation Engineering. [https://doi.org/10.1061/40777\(156\)12](https://doi.org/10.1061/40777(156)12)

En este método, se inicia introduciendo un tubo de acero con punta cerrada en el suelo hasta alcanzar el estrato resistente, donde la punta del vibrador realiza la penetración. A continuación, se coloca el geotextil dentro del tubo y se procede a rellenarlo con piedra. Posteriormente, se abre la punta del vibrador y se levanta, logrando así la correcta fabricación de la columna encapsulada.

Por otro lado, el método de sustitución se realiza con una camisa metálica abierta y es recomendable para suelos con resistencia al corte no drenado “ S_u ” mayores. Este método sigue el procedimiento que se observa en la Figura 19.

La elección del método de sustitución se inclina hacia suelos con una resistencia a la penetración relativamente alta o en situaciones donde es crucial minimizar los efectos de la vibración por diversas razones (Almeida et al., 2018).

Figura 19. Método de sustitución para la construcción de las columnas encapsuladas con geotextil.



Nota: Tomado de “Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing”, por J. Gniel y A. Bouazza, 2010, Geotextiles and Geomembranes. 10.1016/j.geotexmem.2009.12.012

El procedimiento inicia con la inserción de una camisa metálica abierta en el suelo hasta alcanzar el estrato resistente. Luego, mediante el uso de una barrena, se extrae el material contenido en la camisa. Seguidamente, se introduce el geotextil en la camisa y se procede a

llenar el espacio con piedra. Una vez finalizado este proceso, se retira la camisa metálica, dejando formada la columna encapsulada con geotextil.

Como se ha indicado anteriormente, las metodologías constructivas presentadas no constituyen las únicas posibilidades para la fabricación de dichas columnas, y es altamente probable que surjan nuevas metodologías en el futuro, influenciadas por la naturaleza específica de cada proyecto, las propiedades particulares del terreno y otros factores relevantes.

2.2.2 Propiedades del material granular.

Las características geotécnicas del material granular empleado en el relleno de las columnas pueden evaluarse mediante pruebas de laboratorio convencionales, como los ensayos de corte directo o ensayos triaxiales. Aunque existe cierta variabilidad entre las recomendaciones de distintos autores, siendo estas muy similares entre sí, algunas de las directrices fundamentales para la selección del material granular se detallan a continuación.

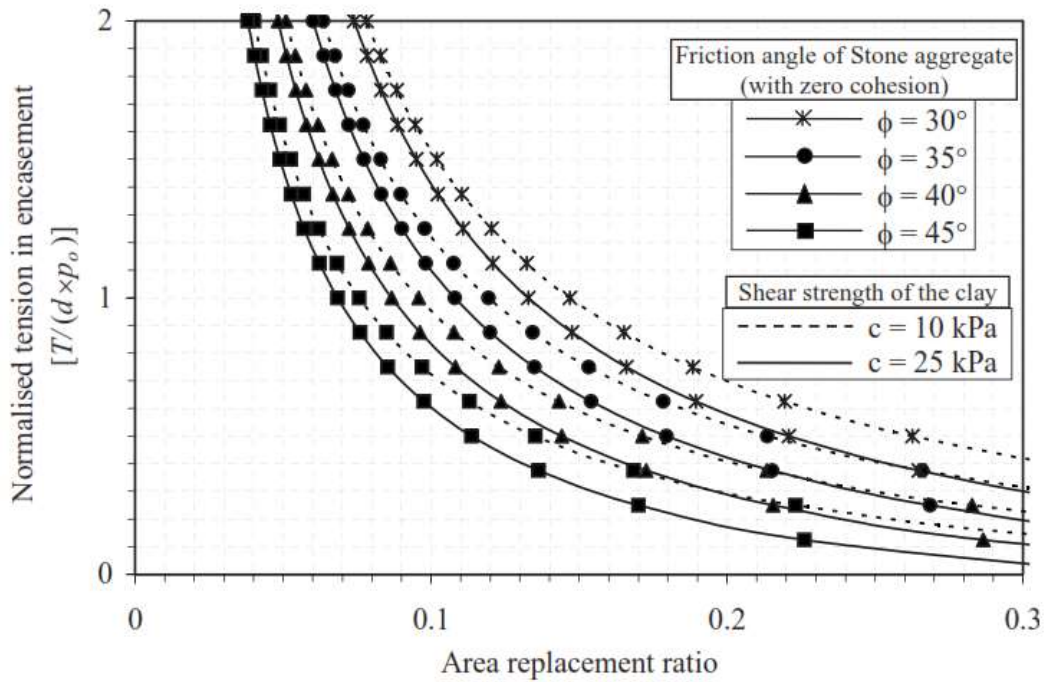
Para las columnas encapsuladas con geotextil construidas con piedra, el material granular debe ser *limpio, preferiblemente piedra triturada, resistente y libre de materiales orgánicos u otras sustancias perjudiciales*. El porcentaje de abrasión evaluado mediante el ensayo de Los Ángeles debe ser inferior al 45% y el tamaño del agregado debe situarse entre 12 y 75mm (Castro, 2017).

En lo que respecta a las densidades y al ángulo de fricción recomendados para las columnas encapsuladas, generalmente se sugieren las mismas recomendaciones que para las columnas de piedra sin recubrimiento de geotextil. Barksdale y Bachus (1983) indican que una construcción adecuada de columnas de piedra debería lograr densidades relativas de la grava superiores al 75%. El ángulo de fricción de las columnas (ϕ) tiene una influencia notable en los resultados de un tratamiento con columnas de piedra y está limitado hasta 50°.

2.2.3 Elección del geotextil apropiado.

El geotextil óptimo a utilizar para las columnas encapsuladas varía en cada proyecto, y la metodología empleada para su selección difiere entre autores. Murugesan y Rajagopal (2009) proponen un enfoque para estimar la resistencia a la tensión admisible de diseño del geotextil, basado en los resultados de su investigación. Su metodología se apoya en el cuadro de diseño presente en la Figura 20, que establece relaciones entre las propiedades del suelo blando, el agregado de la columna y la proporción de área del terreno reemplazado por las columnas de piedra, con la tensión normalizada en el geotextil.

Figura 20. Cuadro de diseño para el cálculo de la tensión requerida por el geotextil en columnas encapsuladas.



Nota: Tomado de “Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns”, por S. Murugesan y K. Rajagopal, 2009, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (1), p. 137.
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000187>

El proceso se lleva a cabo a través de los siguientes pasos simplificados:

1. Se calcula la razón del área reemplazada utilizando una de estas dos fórmulas según corresponda:

$$A_r = 0.907 \times \left(\frac{d}{s}\right)^2 \quad \text{para celdas triangulares.}$$

$$A_r = 0.786 \times \left(\frac{d}{s}\right)^2 \quad \text{para celdas cuadradas.}$$

En donde:

A_r = Razón del área reemplazada.

d = Diámetro de la columna.

s = Separación entre columnas.

2. Con las propiedades conocidas: la resistencia al corte del suelo (c), el ángulo de fricción del agregado (Φ) y la razón del área reemplazada (A_r) previamente calculada, se procede a relacionar y leer la tensión normalizada correspondiente en la Ilustración 20. Para otras propiedades del suelo que no se encuentran en el cuadro, se debe interpolar entre los valores dados.
3. Una vez obtenemos la tensión normalizada (T_n) se procede a calcular la tensión requerida en el geotextil para la máxima presión aplicada.

$$T = \frac{T_n}{d \times p_0}$$

En donde:

T = Tensión del geotextil requerido.

p_0 = Presión aplicada (para el cálculo utilizar la presión máxima de diseño).

4. Se calcula la deformación axial en la columna de piedra y la deformación radial correspondiente a la misma. Así se puede finalmente seleccionar un geotextil adecuado que tenga la suficiente resistencia a la tensión, incluyendo la debida consideración para la deformación a largo plazo correspondiente después de la fluencia, por el recubrimiento.

En este enfoque el soporte de carga del suelo es despreciado (conservadoramente) debido a que las columnas encapsuladas son especialmente utilizadas en los suelos extremadamente blandos con resistencia al corte muy baja.

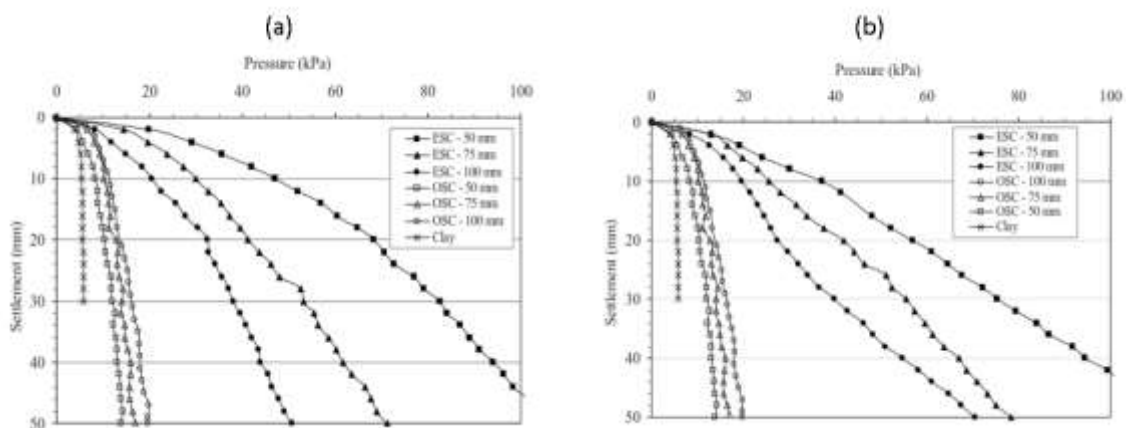
2.2.4 Comparación del comportamiento de las columnas de piedra ordinarias y las columnas de piedra encapsuladas con geotextil.

Murugesan y Rajagopal (2010), llevaron a cabo pruebas en columnas de grava con diferentes diámetros (50, 75 y 100 mm), tanto en columnas de piedra ordinarias (*ordinary stone columns*, OSCs) como en columnas de piedra encapsuladas con geotextil (*encased stone columns*, ESCs). A partir de los resultados obtenidos, se derivaron las siguientes conclusiones:

- Como se evidencia en la Figura 21, las OSCs exhiben claramente una falla alrededor de los 10 mm de asentamiento, indicando una carga última. Después de este punto, no se observa un aumento significativo en la presión necesaria para deformar la columna. En contraste, las ESCs no presentan signos de falla incluso a niveles elevados de asentamiento.

- Las ESCs, demandan una presión de tres a cinco veces superior a la necesaria en las OSCs para lograr un asentamiento de 10mm.
- En el caso de las OSCs, se observa que la presión tiende a aumentar a medida que crece el diámetro de las columnas, aunque esta variación es relativamente pequeña. Sin embargo, el comportamiento es notablemente diferente en las ESCs, donde se evidencia que a diámetros de columna más pequeños se registran presiones más elevadas. Esto se debe a que la presión de confinamiento adicional debido al encapsulamiento es inversamente proporcional al diámetro de la columna.

Figura 21. Gráficas de respuesta “Presión – Asentamiento” de columnas individuales. (a) ESCs con geotextiles no tejidos; (b) ESCs con geotextiles tejidos.

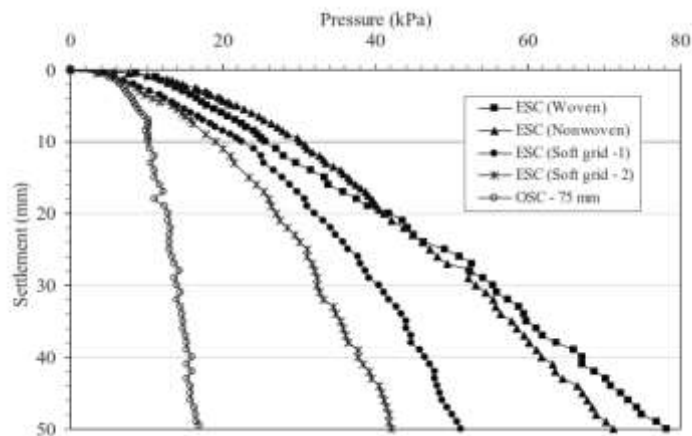


Nota: Tomado de “Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns”, por S. Murugesan y K. Rajagopal, 2009, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136 (1), p. 133-134. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000187>

2.2.5 Comportamiento de las columnas de piedra encapsuladas según el tipo de geotextil.

En el análisis de las columnas de piedra encapsuladas estudiadas de manera individual, como se evidencia en la Figura 22, se destaca que los geotextiles exhiben un rendimiento superior como recubrimiento de las columnas de piedra en comparación con las geomallas, según los diversos tipos de geosintéticos empleados por Murugesan y Rajagopal (2009). Específicamente los geotextiles no tejidos presentan presiones ligeramente mayores a asentamientos hasta de 20mm, sin embargo, para asentamientos mayores los geotextiles tejidos presentan un mejor desempeño.

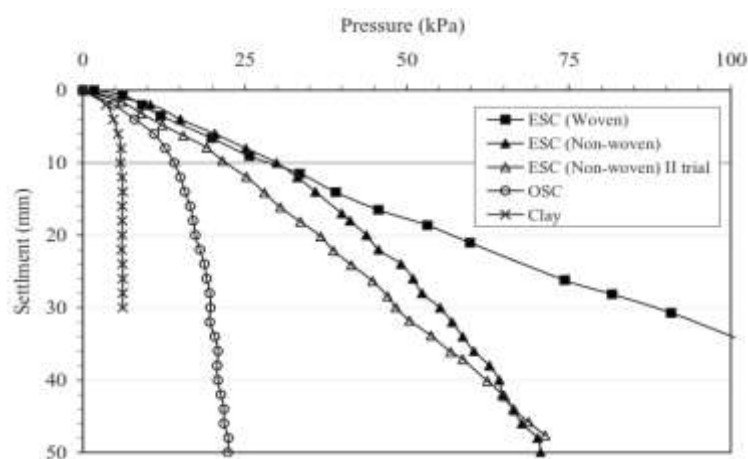
Figura 22. Respuesta aislada de columnas de piedra encapsuladas de 75mm de diámetro en diferentes tipos de geosintéticos.



Nota: Tomado de “Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns”, por S. Murugesan y K. Rajagopal, 2009, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (1), p. 135. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000187>

Sin embargo, al analizar el comportamiento de las ESCs actuando en grupo se puede observar que los geotextiles tejidos presentan un mejor desempeño general en cuanto a presiones que los geotextiles no tejidos. Esto se puede evidenciar en la Figura 23.

Figura 23. Respuesta en conjunto de columnas de piedra encapsuladas de 75 mm de diámetro en diferentes tipos de geotextiles.



Nota: Tomado de “Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns”, por S. Murugesan y K. Rajagopal, 2009, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (1), p. 136. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000187>

Este rendimiento superior de los geotextiles tejidos coincide con las conclusiones de Almeida et al. (2018), quienes argumentan que los geotextiles tejidos son los geosintéticos mayormente preferidos para el recubrimiento de columnas de piedra, atribuyéndolo a diversos factores, siendo la relación de Poisson posiblemente uno de los aspectos más significativos, aunque generalmente se le preste menos atención. Esto se debe a la conveniencia de permitir que ambas direcciones del geosintético trabajen de manera independiente.

2.3 Columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento.

El uso de columnas de piedra de manera general resulta más económico que utilizar pilotes rígidos para la construcción en suelos blandos, pero estas suelen inducir asentamientos más grandes y asentamientos diferenciales aún mayores. Un método para reducir los grandes asentamientos asociados al uso de las columnas de grava es inyectarlas con lechada de cemento, esta técnica es conocida como columnas de piedra inyectadas (Zhou et al., 2002).

Según Yepes (2021), se puede mejorar la resistencia y rigidez de una columna de piedra inyectando una lechada en la misma, para ello se preinstala un tubo de inyección en la perforación antes de que se vierta la piedra, posteriormente se realiza la columna de piedra mediante vibración, y finalmente se inyecta la lechada por el tubo mientras va siendo extraído. También recalca que a su vez esto permite impermeabilizar a la columna de piedra.

Kempfert (2003) menciona que en suelos muy blandos o con capas orgánicas que no proporcionan un soporte lateral suficiente, se pueden formar columnas mediante la inyección de lechada durante la compactación de las piedras. Además, señala que una evolución adicional que ha tenido esta técnica es la utilización de materiales premezclados (lechada + grava), que se instalan mediante el uso de un vibrador de alimentación inferior. También comenta que, en Alemania, el Instituto Alemán de Tecnología de la Construcción (Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt) permite la aplicación de este método en suelos blandos que tengan una resistencia al corte no drenado de al menos 15 kPa, pero que se aceptan capas con una resistencia al corte no drenado de hasta 8 kPa siempre que el grosor de dichas capas sea menor de 1 metro.

Liu et al. (2015) expresa que las columnas de grava inyectadas presentan varias ventajas con respecto a las columnas de grava convencionales, entre las cuales destaca:

1. Una columna de piedra se clasifica normalmente como tipo flexible, y su longitud efectiva de columna suele ser típicamente de 6 a 10 veces su diámetro o de 6 a 8 metros

de longitud. La columna de piedra inyectada es de tipo rígido, y su longitud efectiva de pilote puede llegar hasta los 35 metros.

2. Dado que las columnas de grava inyectada son mucho más rígidas que las columnas de piedra, son más efectivas para el control de asentamientos.
3. Las columnas de piedra no deben utilizarse en suelos con una resistencia al corte no drenado menor a 15 kPa. Sin embargo, las columnas de grava inyectada pueden instalarse en suelos con resistencias menores a esta.
4. La instalación de columnas de piedra requiere una máquina con un mástil tan alto como la longitud de la columna, mientras que la instalación de columnas de grava inyectada no sufre de esta limitación.

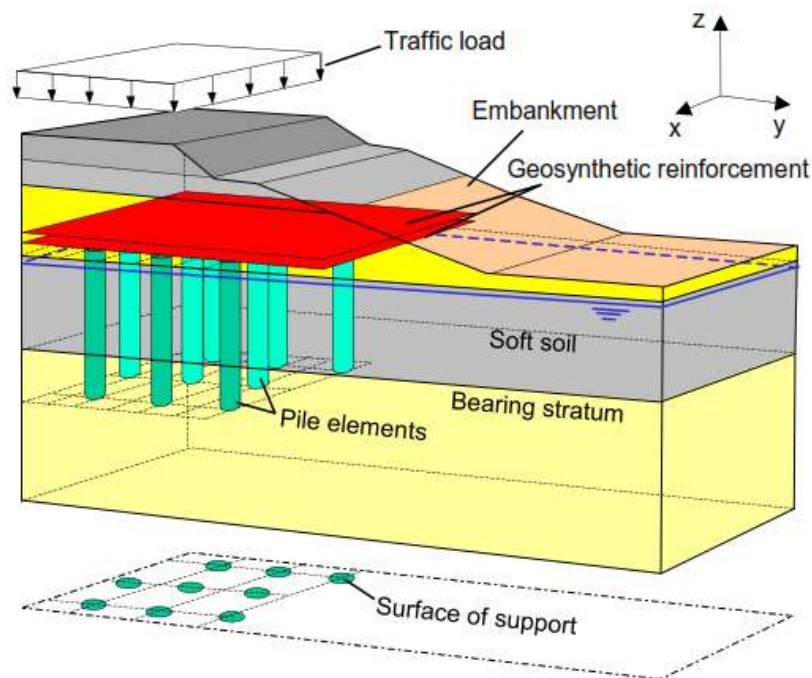
A continuación, se examinan dos casos de construcciones para infraestructura vial en los cuales se emplearon columnas de piedra inyectada y un caso de un diseño preliminar para el mejoramiento de suelos mediante columnas de piedra inyectada para un centro comercial; con el fin de poder analizar el avance en su aplicación, características y métodos de construcción:

2.3.1 Reconstrucción de la vía férrea entre Berlín y Hamburgo. (1993 – 1995; 2003)

En este caso de estudio se hace referencia a las dos reconstrucciones llevadas a cabo en la antigua vía del ferrocarril entre Berlín y Hamburgo, cuya construcción se remonta a la década de 1840.

Heitz et al. (2006) indican que para la cimentación del terraplén del proyecto el sistema utilizado es el de “terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos” (geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment, GPE). Explican que en este sistema los elementos de cimentación tipo pilotes (en este caso columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento) se colocan en un patrón regular sobre el suelo blando hasta un estrato resistente, luego se colocan capas de refuerzo de geosintético sobre los pilotes, y finalmente se coloca el terraplén. Este sistema se puede observar en detalle en la Figura 24.

Figura 24. Sistema de terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos.

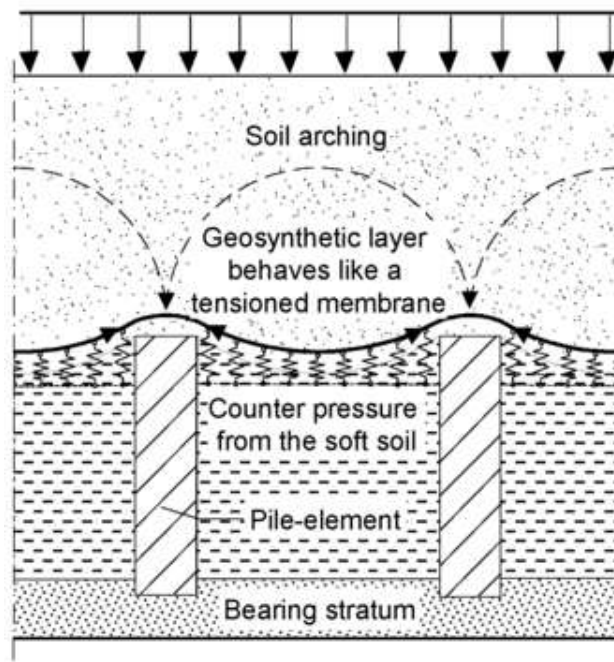


Nota: Tomado de “*Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids*”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1359. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

Kempfert et al. (2004) explican que la liberación de esfuerzos del suelo blando se da por un “efecto de arco” en el terraplén reforzado por encima de los pilotes y por un “efecto membrana” del geosintético de refuerzo, como se observa en la Figura 25. Así mismo explica que una parte de las cargas es soportada directamente por los pilotes, otra parte es inicialmente asumida por el refuerzo geosintético y luego transferida a las cabezas de los pilotes; finalmente, las cargas se transfieren hacia abajo a través de los pilotes hasta el estrato de soporte. Además, algunas partes de las cargas podrían ser soportadas directamente por el suelo blando si se puede desarrollar una contrapresión.

Heitz et al. (2006) señalan que los sistemas GPE tienen importantes ventajas en comparación con las cimentaciones tipo terraplén convencionales tanto técnica, ecológica y financieramente. Resaltan que estos sistemas GPE no requieren tiempo de consolidación, no se requiere importación o exportación de suelo para terraplén adicional para acelerar la consolidación o para compensar el asentamiento, prácticamente no presentan asentamientos adicionales bajo las cargas de tráfico, entre otras. Los autores también resaltan la creciente aplicación de estos sistemas en Alemania a partir del año 2000.

Figura 25. Mecanismo de transferencia de carga de las cimentaciones tipo GPE.



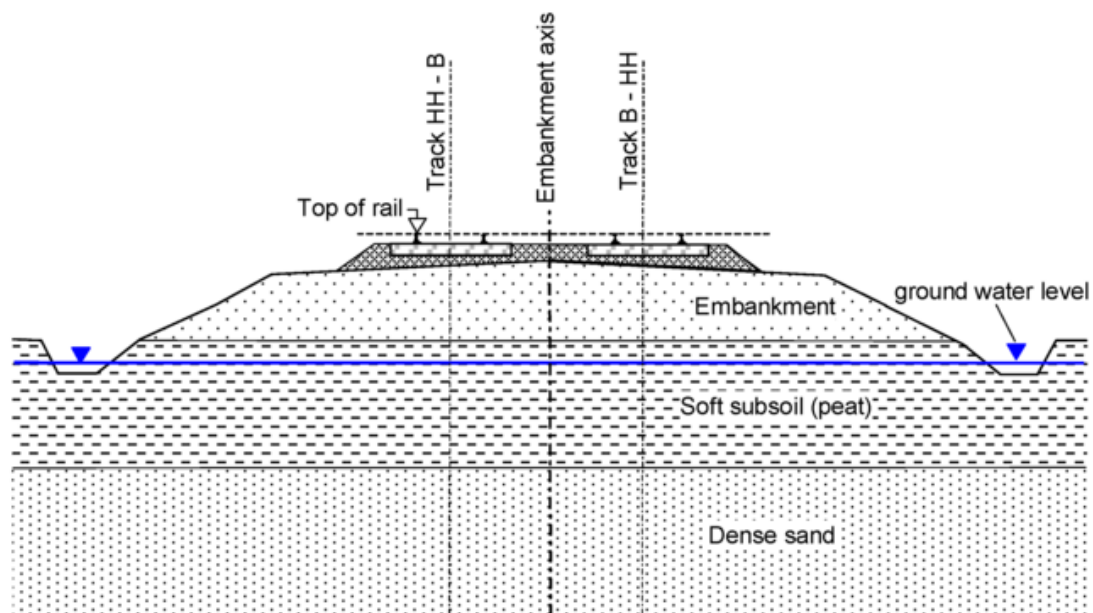
Nota: Tomado de “*Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids*”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1359. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

Heitz et al. (2006) resumen que la primera reconstrucción se dio entre los años 1993 y 1995 y tenía como objetivo permitir velocidades de hasta 200 km/h y el transporte de carga pesada. Indican que, al Oeste de Berlín, en la sección entre Paulinenaue y Friesack, la vía atraviesa una zona con depósitos de suelos orgánicos blandos durante 13 km y por ello se construyó un terraplén sobre columnas de piedra inyectada con una capa de refuerzo de geomalla. Pero poco después de la finalización de la reconstrucción, comenzaron a formarse asentamientos, así como deformaciones en la capa de balasto y por esta razón más la necesidad general de otras mejoras, se planificó una segunda etapa de reconstrucción.

Situación inicial, previa reconstrucción.

En esta zona de 13 km de suelos orgánicos blandos, la sección típica y el perfil del suelo del terreno como se encontraba previo la primera reconstrucción se puede observar en la Figura 26 y consiste de una capa de suelo blando que varía entre 0.5 - 6.5 metros, la capa de suelo resistente profunda se compone de arena densa y el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie. También cuenta con un terraplén de arena suelta de entre 2 y 3 metros de altura que fue construido 150 años antes de la primera rehabilitación para la construcción de la vía férrea.

Figura 26. Sección transversal típica y perfil del suelo antes del mejoramiento de suelo.



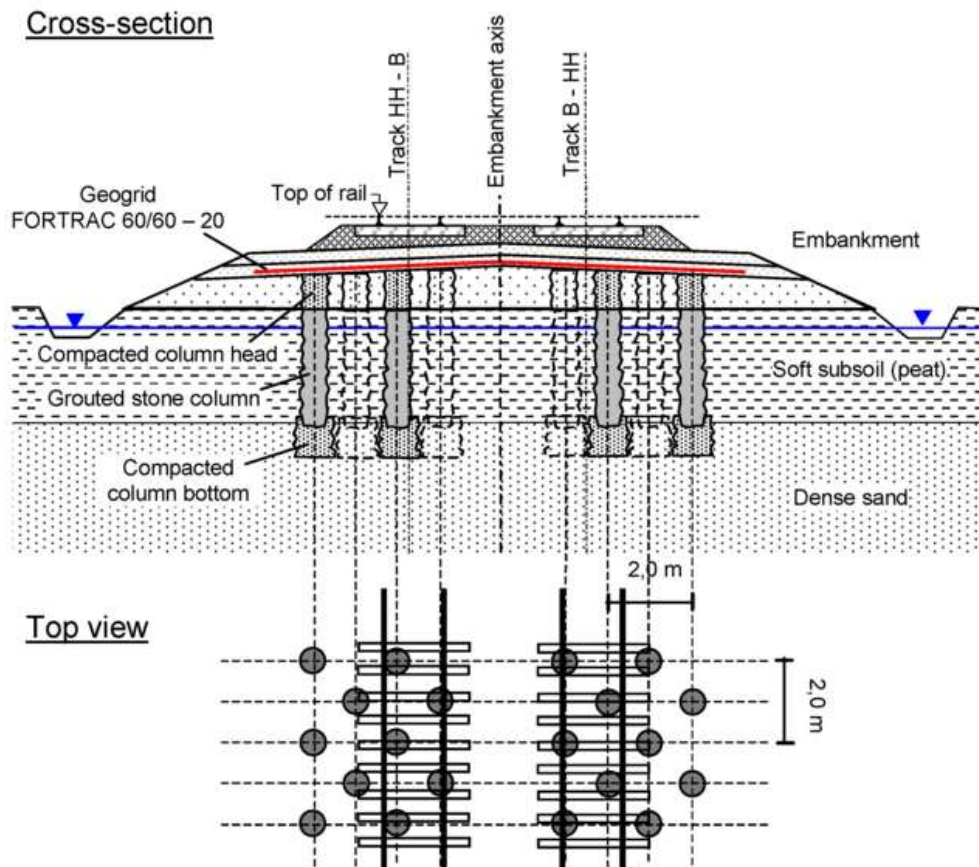
Nota: Tomado de “*Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids*”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1360. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

Primera reconstrucción.

Heitz et al. (2006) explican que debido a que la antigua vía férrea en el tramo entre Paulinenaue y Friesack había experimentado asentamientos significativos en el pasado, fue necesario mejorar la capacidad de carga del terraplén y por ello, durante los años 1993 y 1995, se llevó a cabo un mejoramiento de la vía férrea para permitir una velocidad de 200 km/h y soportar cargas pesadas. La sección transversal típica de la primera etapa de reconstrucción se ilustra en la Figura 27. Esta sección consiste de un terraplén reforzado con geomalla, las columnas de piedra parcialmente inyectadas, el suelo blando orgánico y finalmente el estrato resistente formado por arena densa; los rieles fueron construidos sobre una cama de balasto.

Las columnas de piedra parcialmente inyectadas están formadas de la siguiente manera: los cabezales (dentro del antiguo terraplén) y las bases de las columnas (dentro del estrato resistente) son columnas de piedra simplemente compactadas (no cementadas), la parte restante del cuerpo de las columnas, que atraviesan el suelo blando, son columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento. Las columnas tenían un diámetro aproximado de 60 centímetros y la capa de refuerzo mediante geosintéticos tenía un grosor de 60 centímetros.

Figura 27. Sección transversal típica de la primera reconstrucción.



Nota: Tomado de “Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1360. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

Segunda reconstrucción.

Heitz et al. (2006) comentan que poco después de la finalización de la primera reconstrucción, se produjeron nuevamente asentamientos y deformaciones en la capa de balasto. Por esta razón y también debido a la necesidad general de una mejora adicional de la estructura de la vía para una velocidad de tren de 230 km/h, se planificó una segunda etapa de reconstrucción en el verano de 2001. Pero previo al inicio de la segunda etapa de reconstrucción, se vio la necesidad de comprender el fenómeno que ocasionaba estas deformaciones y debido a esto se llevaron a cabo extensas investigaciones.

Para este fin se cerró un tramo de las vías del tren y se excavó hasta una distancia de 50 metros de profundidad para comprobar el estado de la cimentación, especialmente de las columnas parcialmente inyectadas y la geomalla, a nivel de subsuelo.

De las inspecciones de campo se pudo observar que varias columnas se encontraban debajo de la altura requerida, mientras que la geomalla se encontraba intacta y en excelente condición. En la Figura 28 se puede observar las diferentes alturas de las columnas cementadas.

Figura 28. Área de inspección donde se observan las columnas cementadas con diferentes alturas.



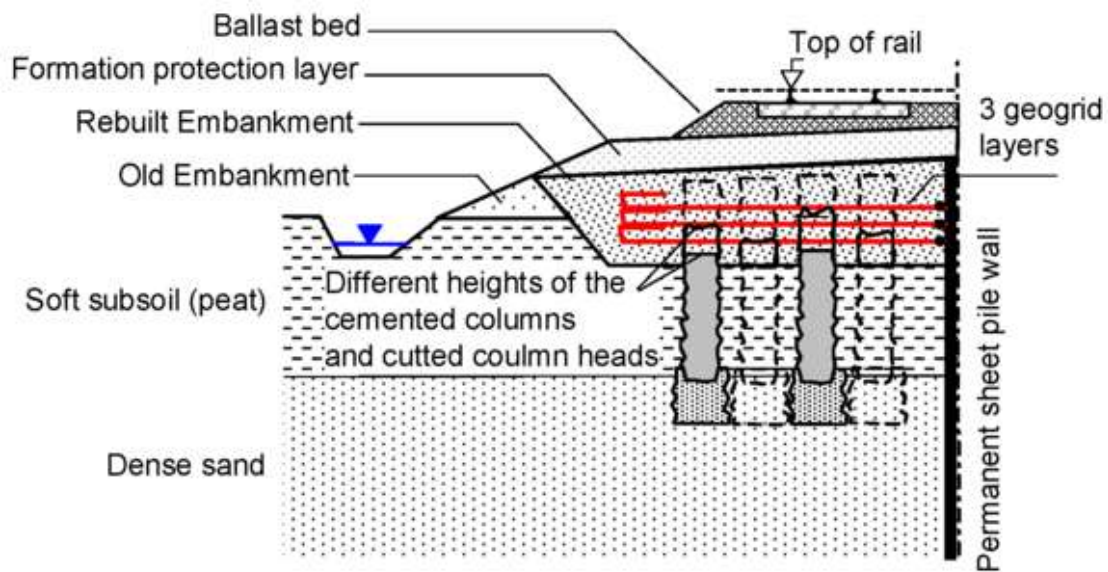
Nota: Tomado de “Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1361. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

Junto con estas inspecciones, varias investigaciones numéricas llegaron a la conclusión de que la estructura de cimentación actual del terraplén no permitía el mejoramiento del tramo de la vía férrea para una velocidad de 230 km/h. Basándose en los resultados de las investigaciones realizadas en el campo y en los resultados de las investigaciones numéricas, se recomendó reconstruir el terraplén en el área de pruebas (donde se realizó la excavación para las inspecciones) utilizando la estructura de vía modificada que se ilustra en la Figura 29. Para esto se recomendó cortar las columnas cementadas para que todas tuvieran la misma altura, esta altura recomendada fue de 3.2 metros debajo de línea del riel debido a que a partir de esa profundidad en adelante todas las columnas cementadas estaban en buena condición.

Los análisis numéricos sugerían que para esa altura de las columnas cementadas sería necesario utilizar 3 capas de geomallas con una resistencia última a la tensión de 200 kN/m (en

lugar de la única capa de geomalla de 60 kN/m que contemplaba el diseño efectuado casi una década atrás en la primera reconstrucción).

Figura 29. *Campo de pruebas reconstruido.*



Nota: Tomado de “*Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids*”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1361. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

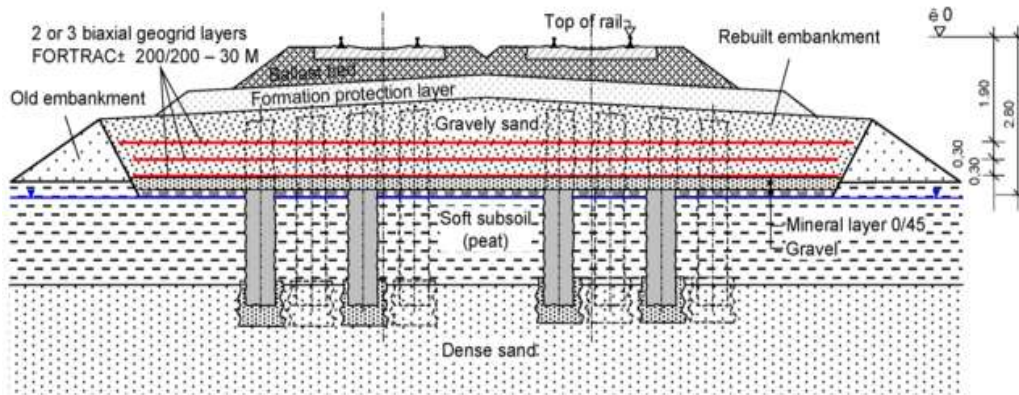
La sección reconstruida había sido instrumentada con inclinómetros y geófonos (acelerómetros) para monitorear el comportamiento de deformación y el comportamiento dinámico de la estructura, y se puso nuevamente en funcionamiento. El rendimiento del sistema se probó durante 15 meses, y su funcionalidad fue confirmada (Heitz et al., 2006).

Una vez confirmado el correcto funcionamiento del sistema propuesto, se realizaron algunas modificaciones durante la construcción. Una de las más significativas fue el ajuste del nivel de corte de las columnas cementadas, reduciéndolo de 3.2 metros a 2.7 metros, medidos desde las vías del riel. Esta modificación se llevó a cabo para evitar trabajar por debajo del nivel freático, el cual se encontraba a 2.8 metros debajo de las vías del riel, y dado que no estaba permitido realizar cambios en el nivel freático.

El antiguo terraplén fue retirado, luego se cortaron las columnas y se excavó el suelo orgánico entre las cabezas de las columnas hasta una profundidad de -2.8 metros por debajo de la parte superior del riel. El área entre las cabezas de las columnas se rellenoó con grava y sobre esto se reconstruyó una capa mineral protectora de 0.2 metros de espesor. Sobre la capa

protectora se colocaron dos o tres capas de geomalla con un espaciado vertical de 0.3 metros. La elección de usar 2 o 3 capas de geomalla se basaba en la cantidad de columnas que se encontraban hasta la profundidad -2.7 metros.

Figura 30. Sección transversal típica de la segunda reconstrucción.



Nota: Tomado de “*Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids*”, por C. Heitz et al., 2006, Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1361. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>

Finalmente, el tramo de 13 km fue reconstruido en solo 76 días entre julio y septiembre del 2003. Para la verificación del diseño y la certificación de la estabilidad y el rendimiento, se implementó un programa de monitoreo el cual incluía tres secciones transversales de medición completamente instrumentadas. También se instalaron numerosos inclinómetros verticales y horizontales, así como geófonos y se realizaron mediciones de los asentamientos de los rieles. Así el monitoreo a largo plazo confirmó la estabilidad y el rendimiento de la estructura.

2.3.2 Construcción de un terraplén para la autopista de circunvalación Ningbo Ring Road Expressway(G1501), Ningbo, Provincia de Zhejiang, China. (2007)

En este caso de estudio se utilizaron las columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento para la construcción de un terraplén para una autopista en Ningbo en China. Para la construcción de este proyecto se utilizó un método constructivo innovador en las columnas cementadas, el cual se describirá en el presente capítulo.

Este método simplificado de construcción de las columnas inyectadas fue desarrollado en China y ha sido adoptado en algunos proyectos de construcción de carreteras a lo largo del país. Para este proyecto el sistema utilizado al igual que el anterior es de terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos (GPE).

Método constructivo utilizado para el proyecto.

El método constructivo utiliza una máquina para la construcción de las columnas inyectadas la cual se ilustra en la Figura 31. Consiste del marco de instalación, la plataforma de perforación y el equipo de inyección de la lechada.

Figura 31. Marco para instalación de las columnas de grava inyectada.



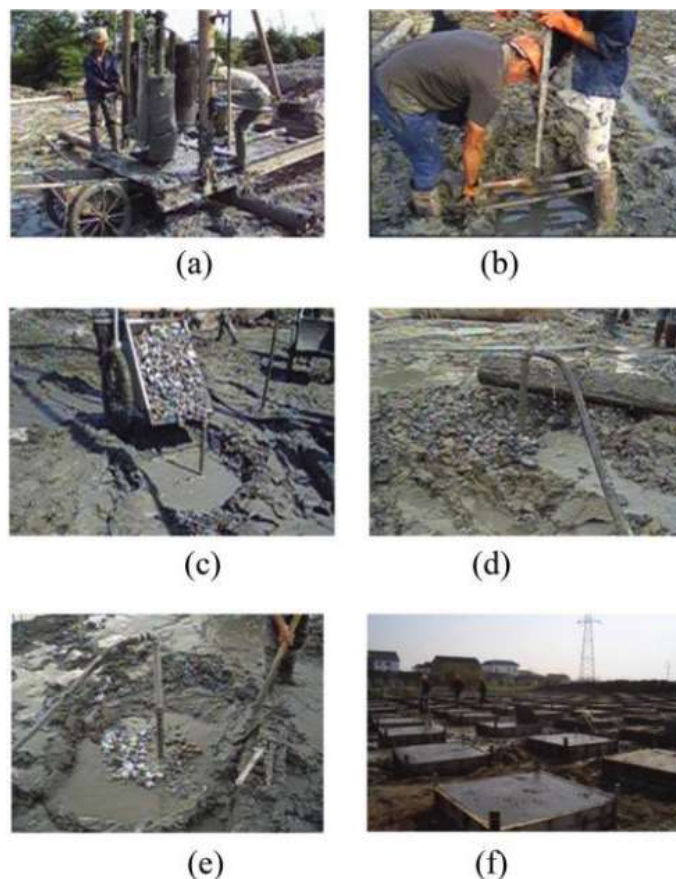
Nota: Tomado de “Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study”, por H. Liu et al., 2015, Canadian Geotechnical Journal, 52 (11), p. 1726. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0284>

Liu et al. (2015) describen que esta metodología consiste de los siguientes pasos:

1. Se perfora un pozo en el suelo blando como se muestra en la Figura 32a. El diámetro de la misma oscila entre 40 y 80 cm. La velocidad de perforación, la densidad de la lechada y la consistencia de la lechada se controlan en el rango de 50 a 100 revoluciones por minuto, 1150 a 1300 kg/m³ y 18 a 25 segundos, respectivamente. Al alcanzar la profundidad requerida, la perforadora se eleva aproximadamente 30 cm y luego gira durante 25-30 minutos. El suelo dejado en el fondo del pozo debe ser inferior a 30 cm.
2. Se añade agua a través de la tubería de perforación para limpiar el pozo y reducir la densidad de la lechada a aproximadamente 1100 kg/m³.
3. Se coloca una tubería de inyección en el centro del pozo (Fig. 32b). Se vierten gravas graduadas en el pozo (Fig. 32c). Se añade agua continuamente para limpiar el pozo y reducir la densidad de la lechada a 1050 kg/m³ (Fig. 32d).

4. Una lechada de cemento, compuesta por una mezcla de cemento de grado 32.5 con una proporción de agua-cemento de 0.5 a 0.6, se bombea al pozo a través de la tubería de inyección utilizando un método de abajo hacia arriba (Fig. 32e). La salida de la tubería de inyección se coloca inicialmente a una altura de 15 a 30 cm por encima del fondo del pozo. Se puede utilizar una presión de inyección de 0.3 a 0.7 MPa y luego la tubería de inyección se retira a una velocidad de 0.3 a 0.5 m/min. Sin embargo, se debe usar una velocidad más lenta de 0.2 a 0.3 m/min cuando se encuentra una capa de arena suelta a medianamente suelta.
5. Se retira la tubería de inyección y, después de 7 a 10 días, se funde un plinto cuadrado de concreto armado en la parte superior de la columna (Fig. 32f).

Figura 32. *Proceso de la construcción de las columnas de grava inyectadas: (a) perforación, (b) instalación del tubo para la inyección de lechada, (c) colocación de piedra, (d) limpieza de la perforación con agua, (e) inyección de lechada de cemento, (f) fundición del plinto en la parte superior de la columna inyectada.*

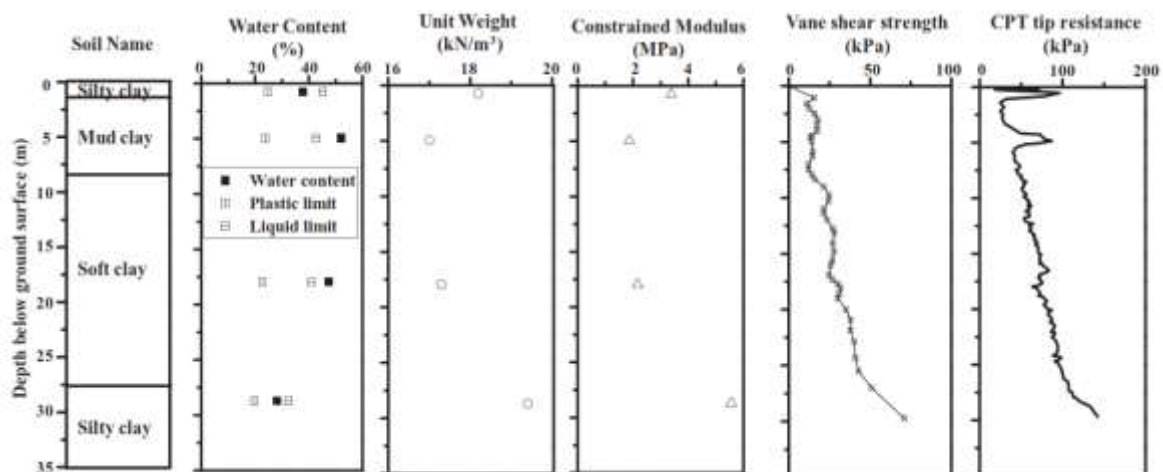


Nota: Tomado de “Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study”, por H. Liu et al., 2015, Canadian Geotechnical Journal, 52 (11), p. 1726. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0284>

Propiedades del suelo.

Liu et al. (2015) describen el perfil principal del suelo y sus propiedades, las cuales se muestran en la Figura 33. Hay una capa de arcilla limosa de 1.5 m de espesor que recubre una capa de arcilla fangosa de 6.9 m de espesor, esto es seguido por una capa de arcilla blanda de aproximadamente 19.1 m de espesor y debajo de la arcilla blanda se encuentra una capa de arcilla limosa media. El nivel freático se encuentra a una profundidad de 1.0 m por debajo de la superficie del suelo. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los tres tipos de suelos pueden clasificarse como arcilla de baja plasticidad (CL). El contenido de agua de las capas de arcilla fangosa y arcilla blanda se encuentra en el rango entre 47% y 52% y generalmente es superior al límite líquido. La resistencia al corte no drenado de las capas de arcilla fangosa y arcilla blanda aumenta aproximadamente de manera lineal con la profundidad. Según el Código de Diseño Chino, GB50021-2001 (Ministerio de Construcción de la República Popular China 2009), la capacidad de carga del suelo de cimentación antes del tratamiento del terreno se puede determinar como 83 kPa utilizando la resistencia a la punta del ensayo de penetración de cono (CPT) indicada en la Figura 33.

Figura 33. *Propiedades del suelo en el sitio.*



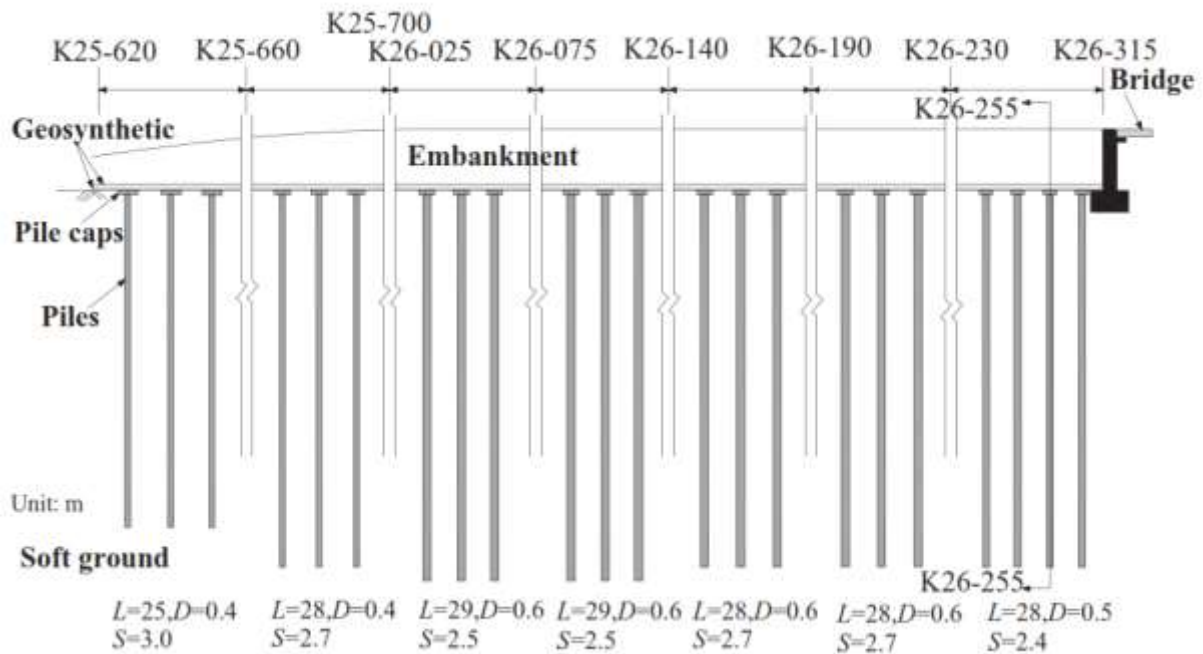
Nota: Tomado de “Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study”, por H. Liu et al., 2015, Canadian Geotechnical Journal, 52 (11), p. 1727. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0284>

Características del proyecto.

En este proyecto las columnas de piedra inyectadas fueron utilizadas para soportar un terraplén reforzado con geomalla para los accesos de un puente. La longitud total del terraplén fue de 360 m y la altura promedio del relleno estaba entre 2.5 y 4.9 m. Las columnas de grava

inyectada, el tamaño de la plataforma de pilotes y la relación de mejora de la columna al suelo utilizada para el acceso al puente variaban de una sección a otra en términos de longitud, espaciado y diámetro. Esto se puede observar en la Figura 34.

Figura 34. Sección transversal de los accesos del puente.



Nota: Tomado de “Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study”, por H. Liu et al., 2015, Canadian Geotechnical Journal, 52 (11), p. 1728. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0284>

La sección transversal mostrada fue instrumentada en su totalidad, los instrumentos de medición utilizados incluyen: placas de asentamiento superficial, inclinómetros, piezómetros y celdas de presión.

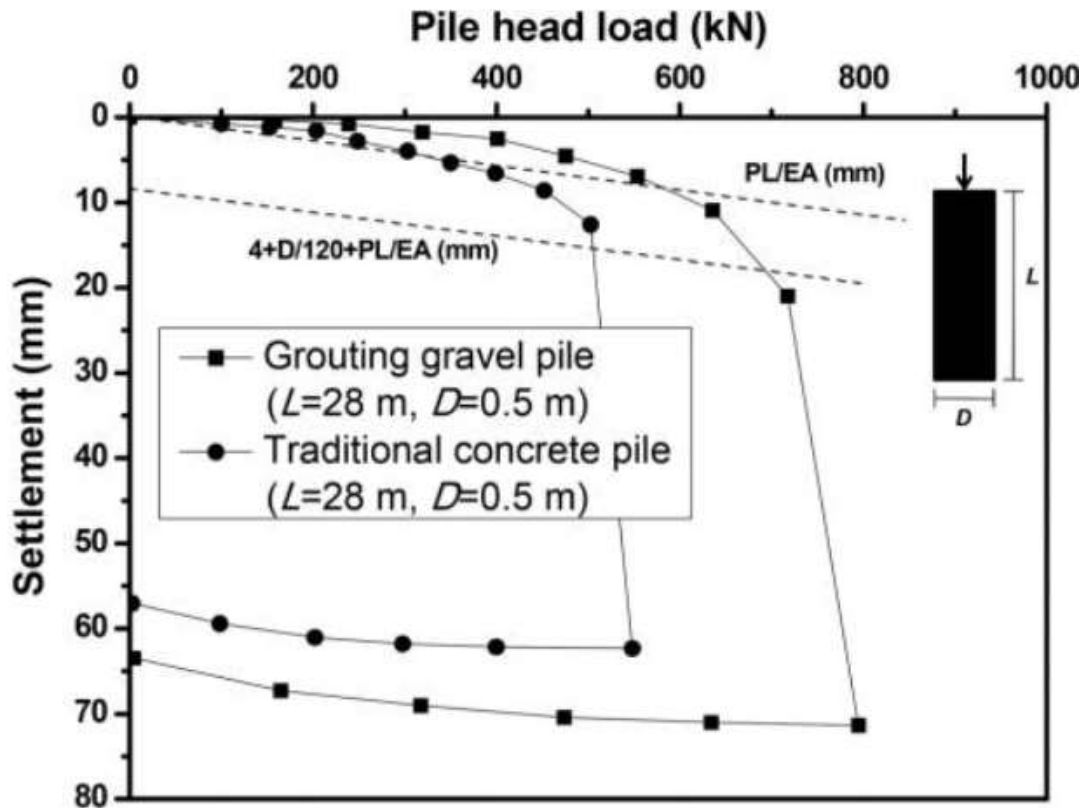
Como se puede observar en la Figura 34, la columna K26-255 tiene una longitud de 28 m, un diámetro de 0.5 m y una separación con las columnas de esa sección de 2.4 m. Esta columna fue usada para realizar una comparación con un pilote de concreto de similares características para contrastar los resultados en ambos elementos. El pilote de prueba construido tenía la misma longitud y diámetro que la columna de piedra inyectada K26-255 y un módulo de 15 GPa.

Prueba estática de carga en pilotes en campo.

Se llevaron a cabo pruebas estáticas de carga en el campo tanto en columnas de grava inyectada como en pilotes perforados de concreto, los cuales fueron fundidos en el lugar.

Ambas pruebas se presentan en la Figura 35. El procedimiento para la prueba de carga en pilotes siguió el Código Chino de Cimentación JGJ94 (Ministerio de Construcción de la República Popular de China 2008).

Figura 35. Curvas de carga – asentamiento de una columna inyectada y de un pilote perforado.



Nota: Tomado de “Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study”, por H. Liu et al., 2015, Canadian Geotechnical Journal, 52 (11), p. 1731. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0284>

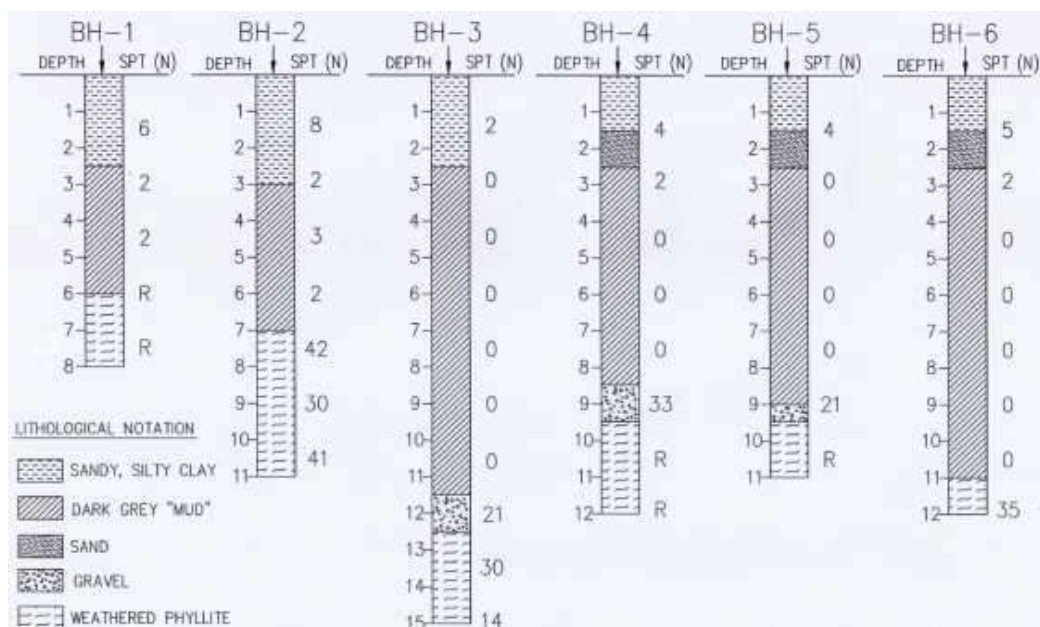
De la Figura 35 se determinaron las capacidades a cargas últimas de compresión de ambos elementos, 700 kN para la columna inyectada y 500 kN para el pilote perforado. Por lo tanto, la columna de grava inyectada ofreció un 40% más de capacidad de carga en comparación con un pilote perforado de concreto de igual diámetro y longitud. Pero Liu et al. (2015) teorizan que la mayor capacidad de carga ofrecida por la columna de piedra inyectada puede explicarse por el hecho de que el suelo alrededor de las columnas de piedra también recibe un mejoramiento por el cemento, por lo tanto, la fricción entre la columna y el suelo es mayor que en el caso del pilote. Aunque reconocen que el suelo debajo de la punta del pilote también fue cementado y aun así la resistencia es mucho mayor en las columnas.

2.3.3 DISEÑO PRELIMINAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN CENTRO COMERCIAL EN MUĞLA-MILAS, TURQUÍA. (2021)

En la fase inicial de este proyecto, se consideró la posibilidad de utilizar columnas de piedra convencionales para el mejoramiento del suelo. Sin embargo, tras evaluar la capacidad de carga y los asentamientos del terreno, se constató que la resistencia al corte no drenado era considerablemente baja, lo que descartó la aplicabilidad de dicho método. Ante esta limitación, se propusieron dos soluciones alternativas viables: una basada en el uso de pilotes y la otra en la implementación de columnas de piedra inyectadas. en el análisis detallado del diseño preliminar que implica el uso de columnas de piedra inyectadas.

El perfil del suelo en el área del proyecto, junto con el correspondiente número de golpes medidos mediante el ensayo SPT, se presenta en la Figura 36. En esta figura, se aprecia que la capa de *lodo gris oscuro* varía en profundidad entre 4 y 9 metros. En la mayoría de los casos, el número de golpes asociado al ensayo SPT en esta capa es de 0, indicando así que este estrato es altamente blando y se encuentra en proximidad a la superficie, a una profundidad que oscila entre 1.5 y 2.5 metros.

Figura 36. Perfil del suelo y resultados de los ensayos de sitio (SPT).



Nota: Tomado de "A preliminary design of ground improvement by grouted stone columns for a shopping centre", por A. Ünver İ. Ünver, 2021, 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site. https://www.researchgate.net/publication/356616645_A_preliminary_design_of_ground_impovement_by_grouted_stone_columns_for_a_shopping_centre

Ünver y Ünver (2021) explican que las columnas de piedra inyectadas utilizan una suspensión de agua-cemento que se adiciona a las columnas de piedra convencionales y los cálculos de capacidad de carga pueden realizarse mediante los mismos principios utilizados en los cálculos de pilotes por punta. Además, señalan que la presencia de capas estables de grava y filita meteorizada debajo de los suelos débiles en el sitio contribuye a una capacidad de carga significativamente elevada en las columnas de piedra inyectadas.

Los cálculos para determinar la capacidad de carga de las columnas inyectadas fueron realizados por diversos métodos y se obtuvo una capacidad de carga permisible promedio de $Q= 400\text{kN}$ al aplicar un factor de seguridad de 3, mientras que, para los edificios con cimentación tipo losa se diseñaron plintos cuadrados de 2.5 m y 3 m según cada caso (Ünver & Ünver, 2021).

Ünver y Ünver (2021) mencionan que para el diseño preliminar de las columnas inyectadas se escogió un diámetro de 60 cm, y se prevé formar bases ampliadas de 80 cm en la punta de las columnas. Además, sugieren la creación de rellenos granulares de alta calidad, con un espesor de 60 cm y reforzados con dos capas de geomallas, debajo de los edificios prefabricados que posean cimientos individuales, así como en la base de los rellenos del estacionamiento. El objetivo es obtener un efecto de arco mediante rellenos reforzados, de manera que todas las cargas de la superestructura se transfieran a columnas de piedra inyectadas. De este modo, se evitará la carga sobre los suelos subyacentes débiles y se minimizará la probabilidad de formación de fricciones negativas en las columnas de piedra inyectadas.

Se puede observar que el sistema utilizado es de terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos al igual que en ambos proyectos descritos anteriormente.

CAPITULO III. PROPUESTA DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO PARA MEJORAMIENTO DE SUELOS BLANDOS.

3.1 Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil.

En esta tesis se plantea la implementación de un nuevo elemento constructivo para el mejoramiento de suelos blandos en la ciudad de Guayaquil, así como una metodología constructiva económicamente viable para este elemento. Una de las características principales de esta propuesta es que permite su implementación en suelos sumamente blandos, en donde la maquinaria de construcción común enfrenta limitaciones de acceso. Este elemento es la columna de piedra inyectada y revestida con geotextil (CPIR), la cual surge como una combinación de dos enfoques utilizados actualmente: la columna de piedra inyectada y la columna de piedra revestida con geotextil.

Este nuevo elemento junto con la metodología constructiva propuesta intenta aprovechar las ventajas de ambos métodos manteniéndose como una opción técnica y económicamente viable. Este objetivo se busca alcanzar a través de tres puntos clave: alto rendimiento constructivo, reducción de la cantidad de lechada a utilizar, y la prevención de la mezcla con el nivel freático.

El alto rendimiento constructivo se espera lograr gracias a la metodología implementada. En primer lugar, la introducción de la camisa metálica se realizará de manera sencilla, ya que no requerirá perforación o barrenado del terreno porque será simplemente hundida en el terreno. Además, una vez que la camisa se haya insertado en el suelo, la construcción del elemento puede llevarse a cabo de inmediato. Posteriormente, la camisa recuperable podrá retirarse y reutilizarse en la construcción de otra columna. Este proceso es posible gracias a la función de aislamiento proporcionada por el geotextil, que separa la columna del terreno de manera eficaz.

La reducción de la cantidad de lechada y la prevención de la mezcla con el nivel freático son dos aportes importantes que otorga el uso del geotextil en la columna inyectada. Al funcionar como una barrera entre el terreno y la columna, el geotextil previene que la lechada se escape fuera de la columna hacia el suelo circundante. Además, previene que el agua del nivel freático ingrese a la columna sin necesidad de tomar medidas adicionales.

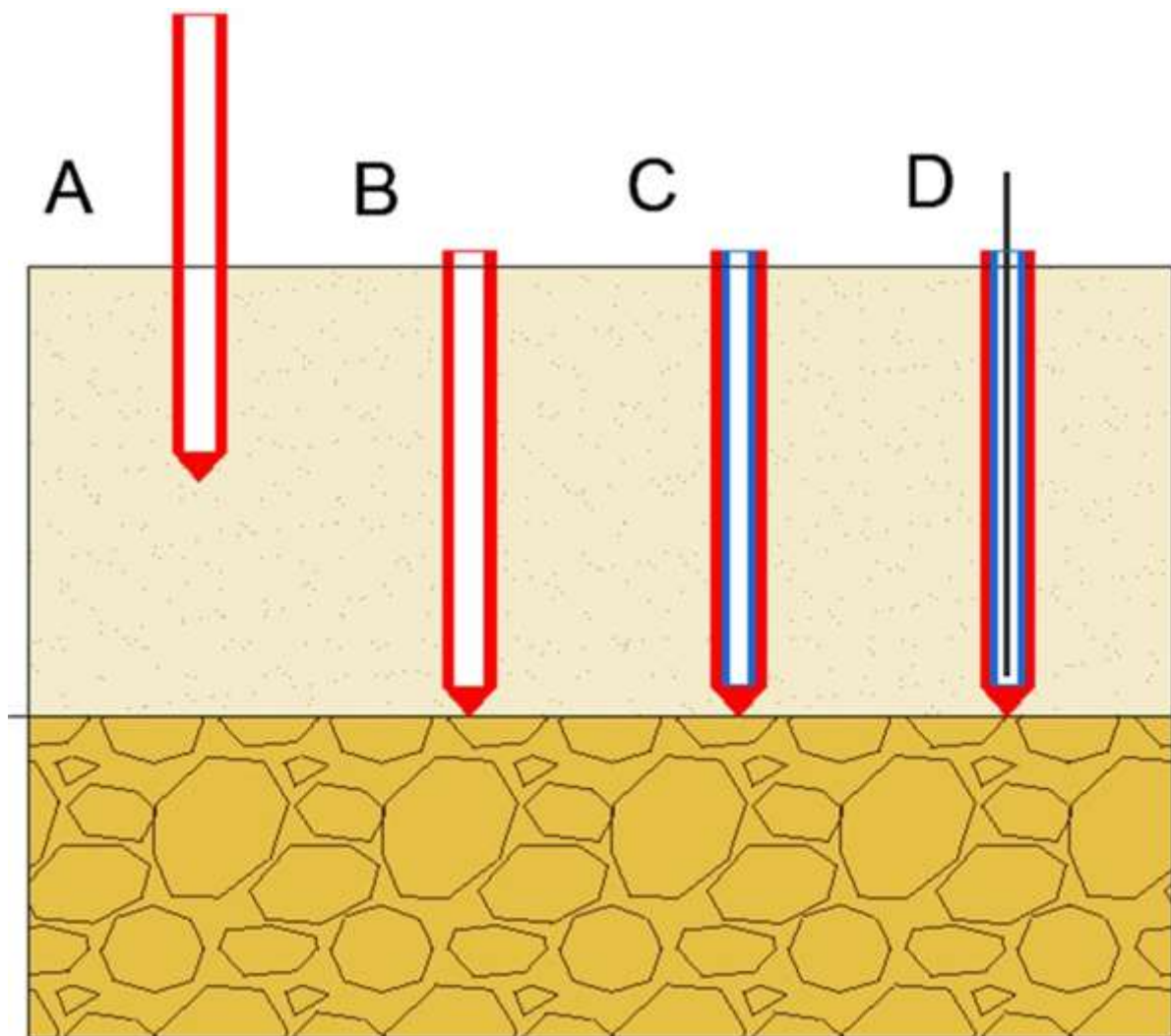
Este elemento constructivo no solo supera las limitaciones asociadas con suelos sumamente blandos, sino que también ofrece una solución alternativa que optimiza el

rendimiento constructivo. La combinación de la camisa metálica recuperable y el geotextil, al tiempo que simplifica el proceso de introducción en el suelo, garantiza un alto rendimiento y permite la reutilización de recursos. Con esta propuesta, se pretende establecer una metodología constructiva eficiente para un nuevo elemento destinado al mejoramiento de suelos blandos en la ciudad de Guayaquil.

3.1.1 Proceso constructivo.

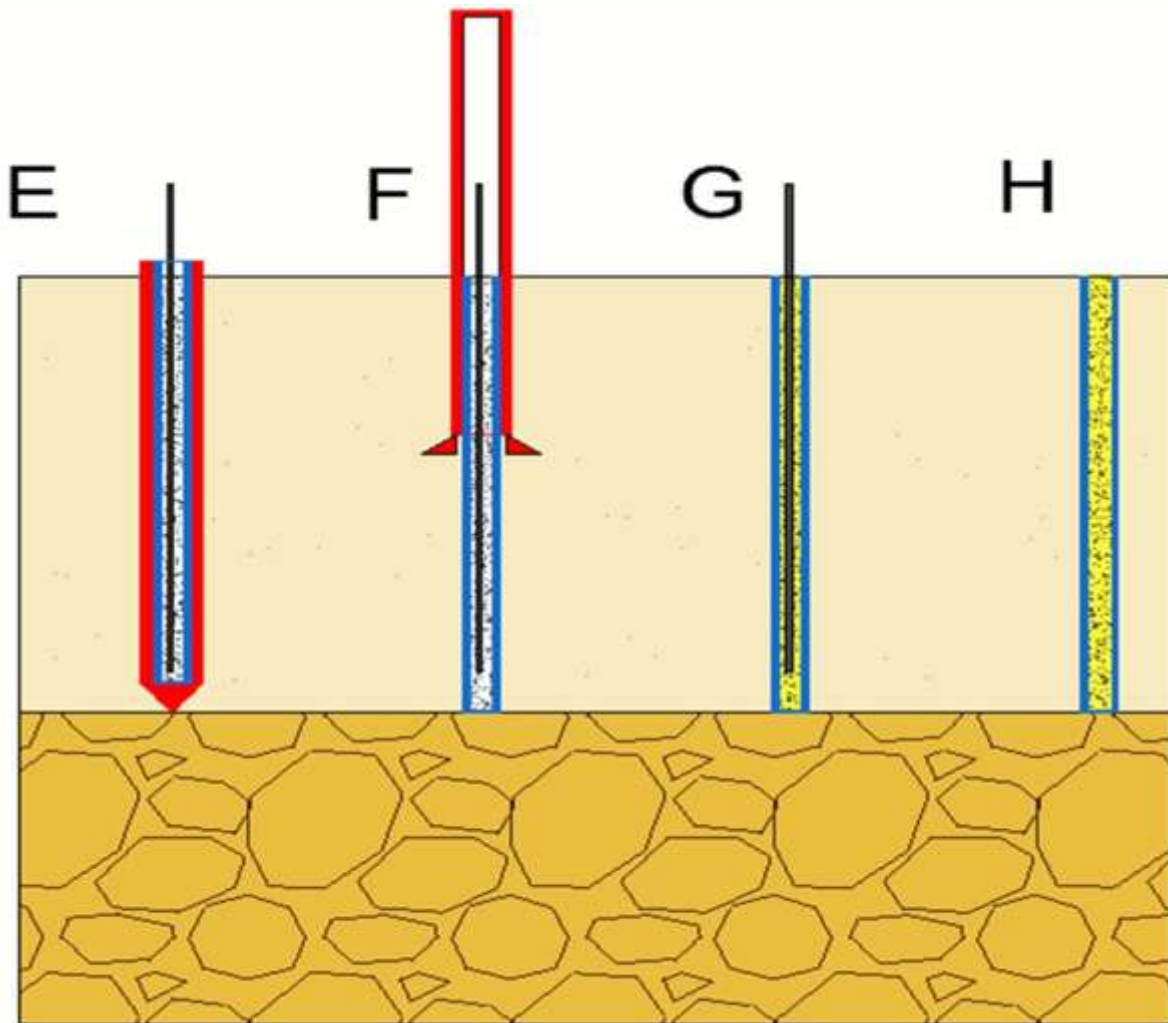
El proceso constructivo propuesto en esta tesis para la construcción de las columnas de piedras inyectadas y revestidas con geotextil se ilustra en las Figuras 37 y 38, y es explicado a continuación.

Figura 37. Proceso constructivo para la metodología propuesta.



Nota: Elaboración propia.

Figura 38. *Proceso constructivo para la metodología propuesta.*

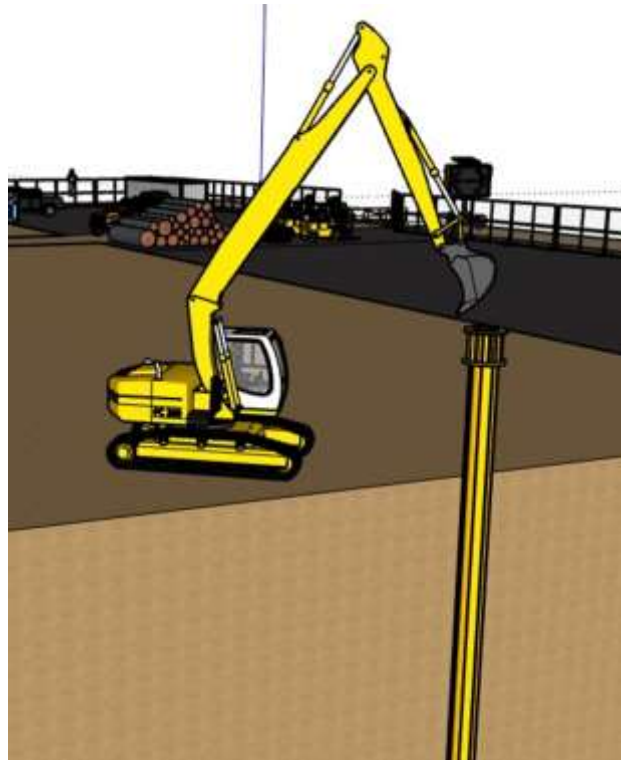


Nota: Elaboración propia.

En las figuras anteriores se puede observar los pasos de la metodología constructiva propuesta los cuales son los siguientes:

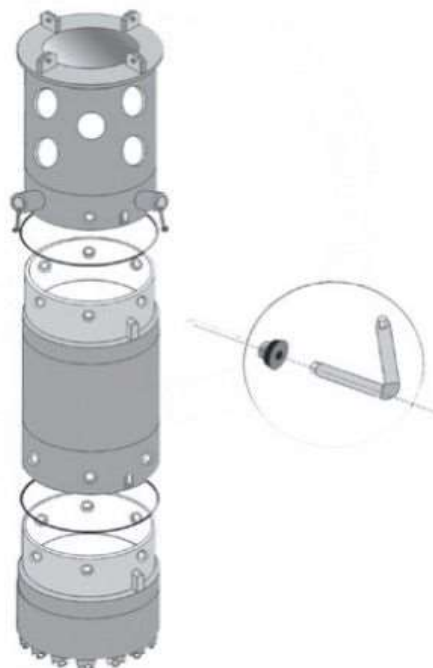
1. Se introduce la camisa metálica recuperable en el suelo blando mediante hincado por presión hidráulica hasta la profundidad deseada como se observa en la Figura 39. La camisa metálica recuperable será armada en segmentos (Figura 40) de 3 metros a medida que se va hundiendo en el suelo blando y la punta de la camisa debe ser articulada (Figuras 41 - 42), de tal manera que permanezca cerrada hasta que el peso de la piedra provoque su apertura. La punta de la camisa sirve para facilitar la introducción de la camisa en el suelo blando.

Figura 39. *Hinca de la camisa metálica recuperable por presión hidráulica.*



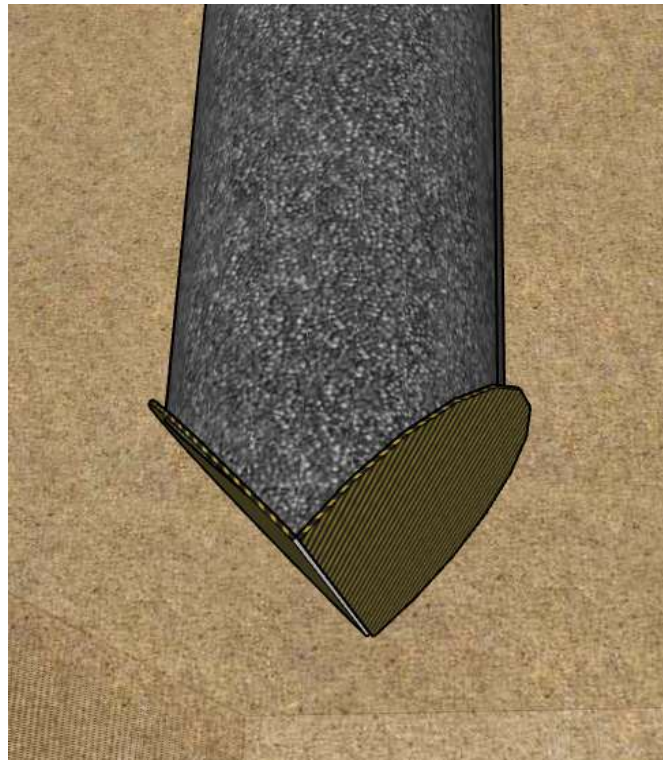
Nota: Elaboración propia.

Figura 40. *Camisa metálica armada por tramos.*



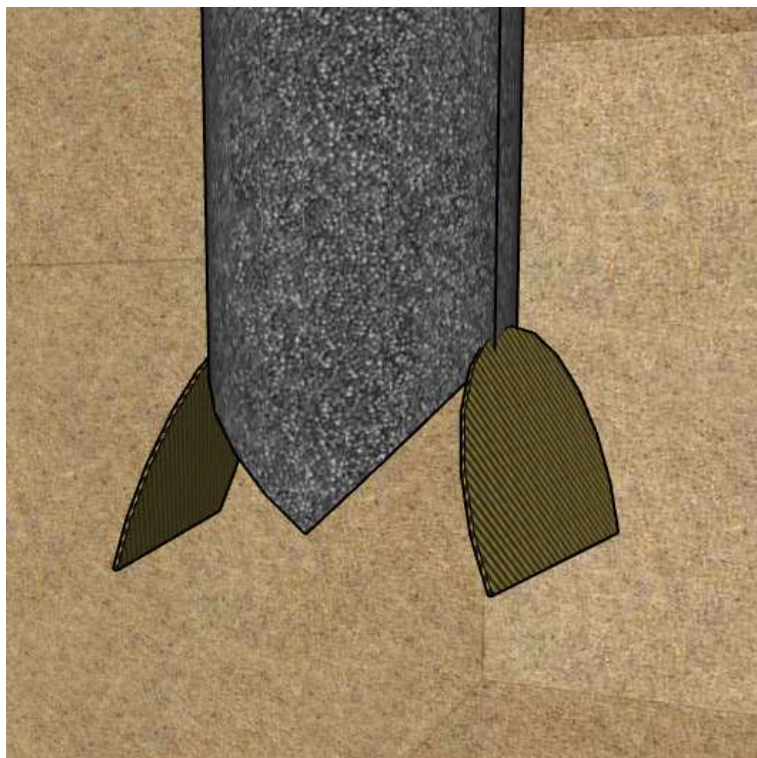
Nota: Tomado de “Pilotes perforados de camisa recuperable: Pilote CPI-4.”, por V. Yepes, 2015, El blog de Víctor Yepes, <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/01/30/pilotes-cpi-4/>

Figura 41. *Punta de la camisa metálica recuperable cerrada.*



Nota: Elaboración propia.

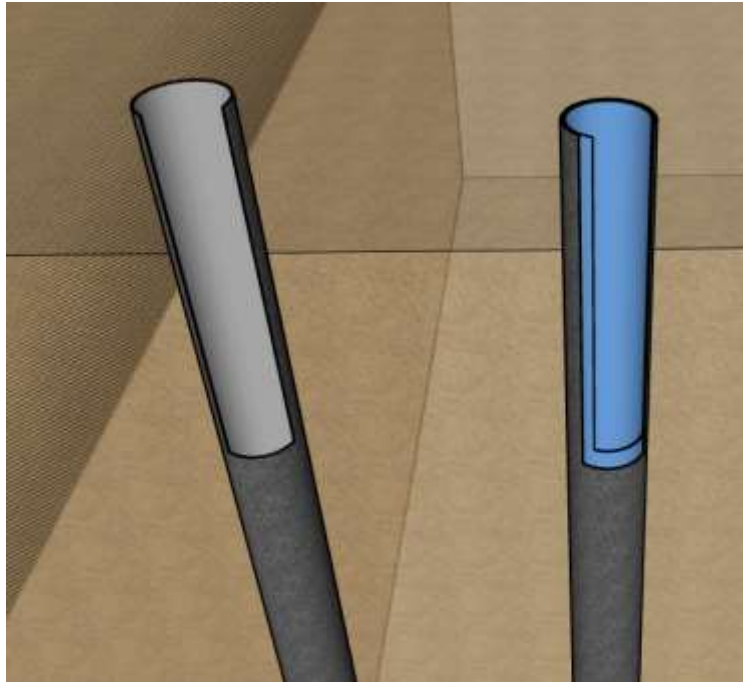
Figura 42. *Punta de la camisa metálica recuperable abierta.*



Nota: Elaboración propia.

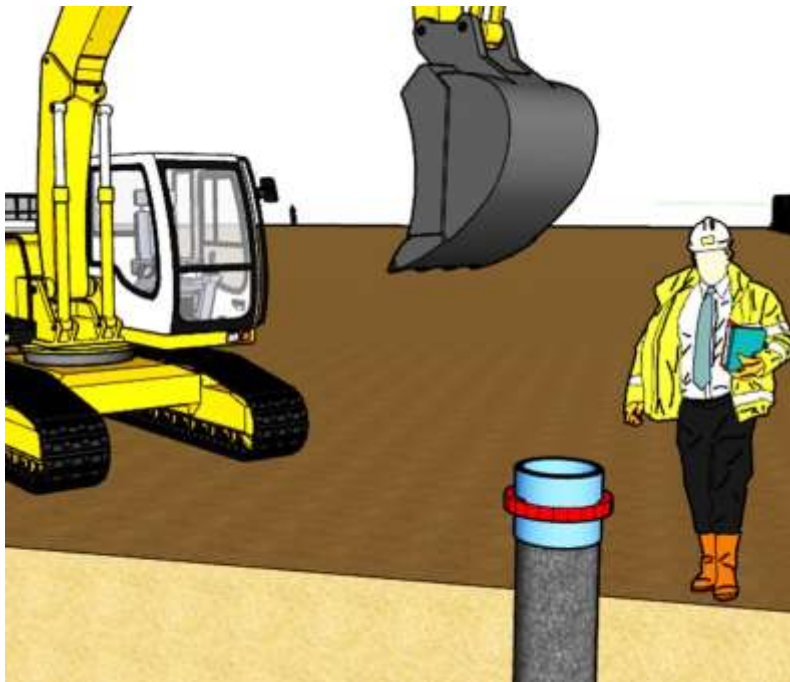
2. Una vez que la punta de la camisa ha alcanzado la profundidad requerida, se procede a tender el geotextil tubular dentro de la camisa.

Figura 43. Colocación del geotextil tubular en la camisa.



Nota: Elaboración propia.

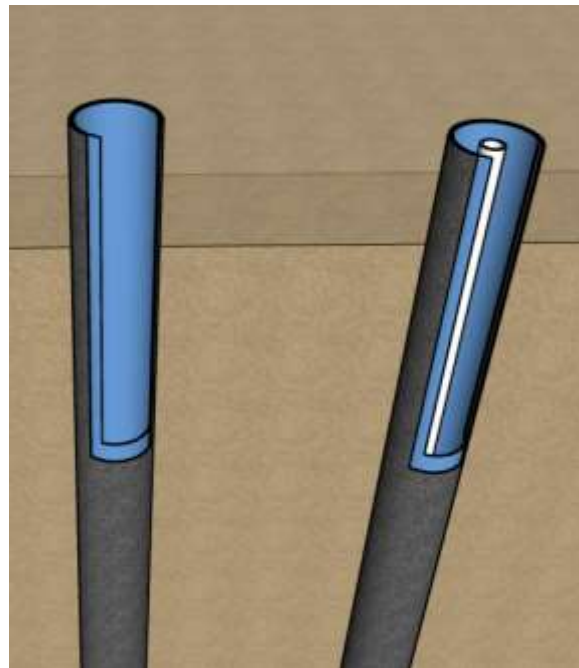
Figura 44. Geotextil tubular colocado en la camisa metálica.



Nota: Elaboración propia.

3. Se coloca el tubo de inyección dentro del geotextil contenido en la camisa.

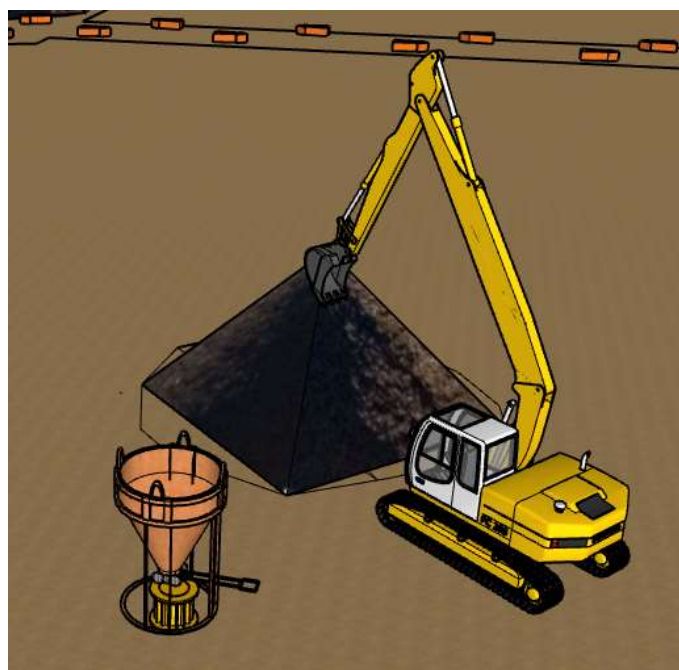
Figura 45. Colocación del tubo de inyección.



Nota: Elaboración propia.

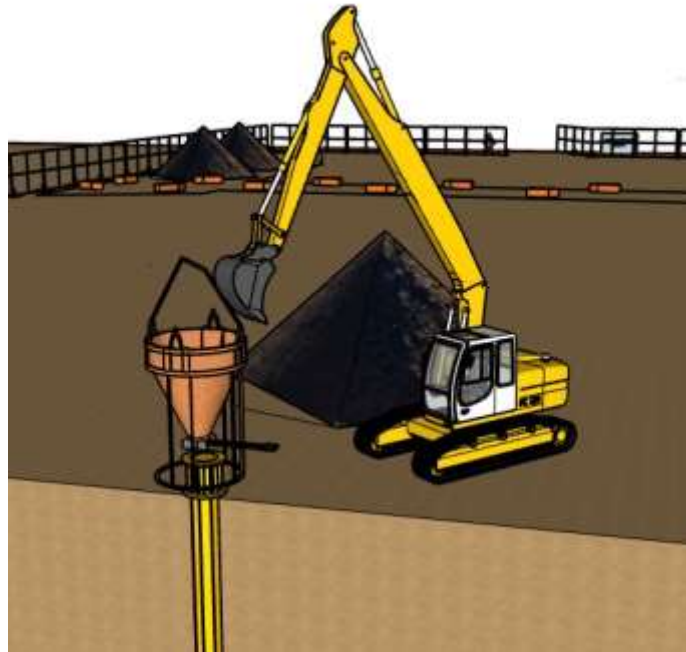
4. Se rellena la camisa con piedra con la ayuda de un embudo como se ilustra en las Figuras 46 – 48.

Figura 46. Llenado del geotextil con piedra.



Nota: Elaboración propia.

Figura 47. *Llenado del geotextil con piedra.*



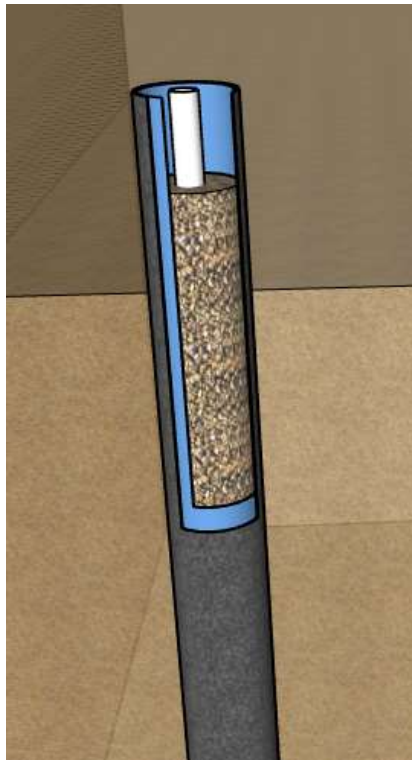
Nota: Elaboración propia.

Figura 48. *Llenado del geotextil con piedra, usando el embudo.*



Nota: Elaboración propia.

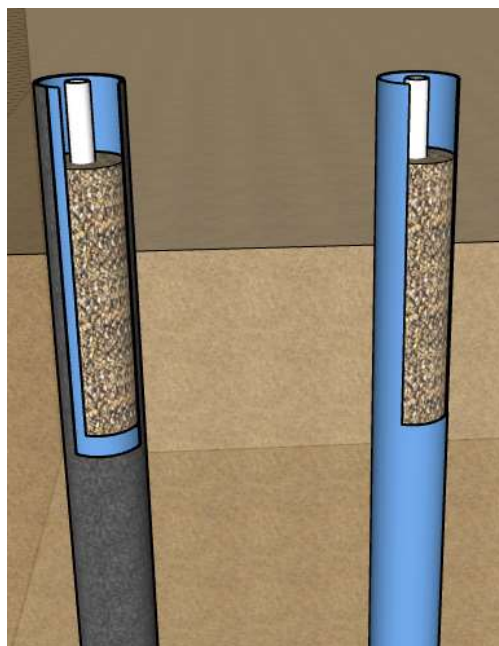
Figura 49. Finalización del llenado de la piedra.



Nota: Elaboración propia.

5. Se retira la camisa metálica dejando formada la columna de piedra revestida lista para ser inyectada.

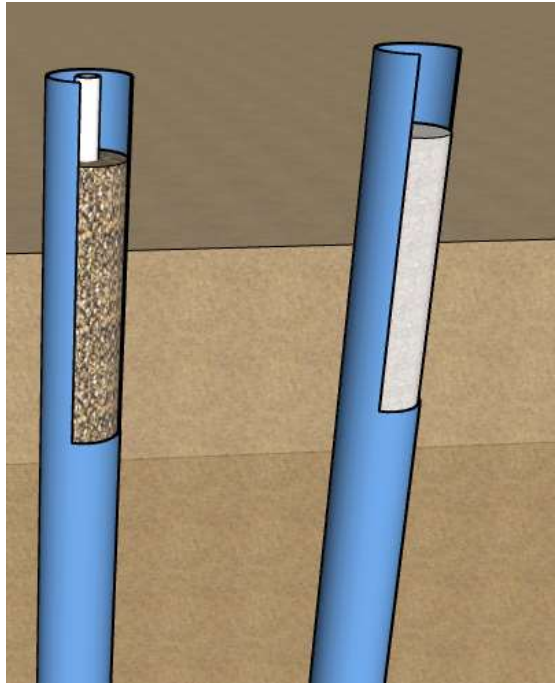
Figura 50. Camisa metálica retirada.



Nota: Elaboración propia.

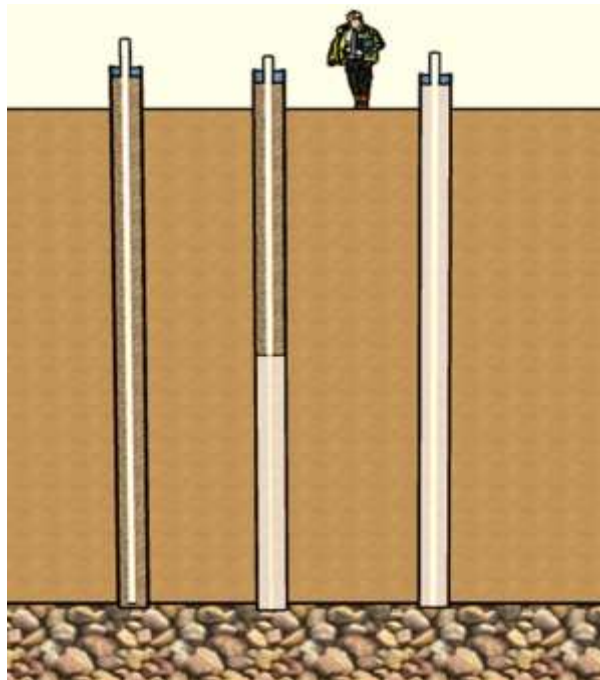
6. Se realiza la inyección de la lechada de cemento a través del tubo de inyección y luego se retira dicho tubo.

Figura 51. *Inyección de la lechada de cemento en la columna de grava.*



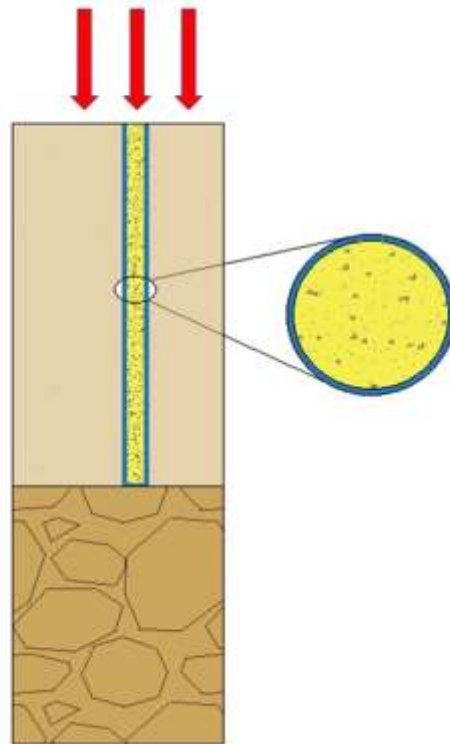
Nota: Elaboración propia.

Figura 52. *Inyección de la lechada de cemento en la columna de grava.*



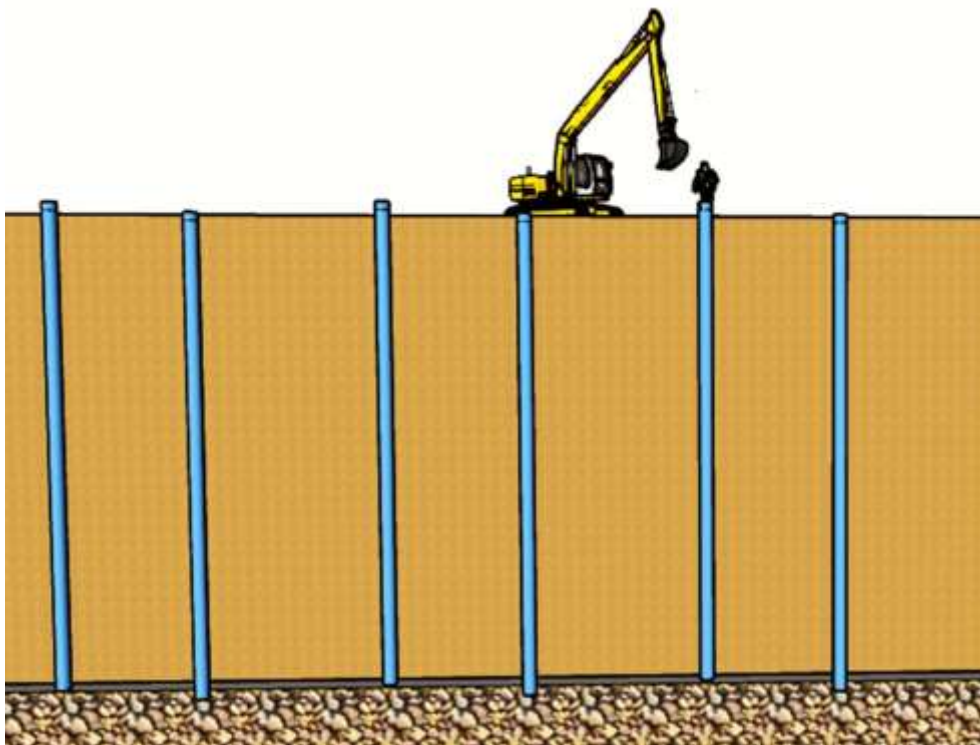
Nota: Elaboración propia.

Figura 53. *Detalle de la columna de piedra inyectada y revestida con geotextil construida.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 54. *Columnas de piedras inyectadas y revestidas con geotextil construidas.*



Nota: Elaboración propia.

3.2 Ensayos de laboratorio de la lechada de cemento.

3.2.1 Diseño de lechada de cemento.

Para el diseño de la lechada de cemento se tuvo en consideración asegurar que la lechada de inyección fuera lo suficientemente fluida para penetrar de manera efectiva entre las columnas de piedra, minimizando la presencia de espacios vacíos, pero a su vez se consideró que la resistencia de la misma no fuera excesivamente baja. Con este objetivo en mente, se buscó seleccionar la relación agua/cemento más baja que cumpliera de manera óptima con este propósito. Durante las pruebas de laboratorio, se observó que con una relación agua-cemento mayor o igual a 0,65 se conseguía la consistencia necesaria para lograr una penetración adecuada entre las columnas, pero con el uso de un aditivo plastificante se lograba bajar esta relación hasta 0,55 cumpliendo de igual manera con este objetivo.

Para llevar a cabo la formulación experimental de la lechada de cemento, se empleó la cantidad de aditivo recomendada por el fabricante junto con la relación agua-cemento previamente determinada.

Tabla 2. *Diseño de lechada de cemento.*

DISEÑO DE LECHADA DE CEMENTO f'c=80kg/cm2	
Materiales	Peso (g)
Cemento	6380
Agua	3509
Aditivo	95.7
a/c	0.55

Nota: Elaboración propia.

Tabla 3. *Diseño de lechada de cemento para un metro cúbico.*

DISEÑO DE LECHADA DE CEMENTO f'c=80kg/cm2 POR METRO CUBICO	
Materiales	Peso (kg)
Cemento	1160
Agua	638
Aditivo	17.4
a/c	0.55

Nota: Elaboración propia.

3.2.2 Elaboración de la lechada de cemento y llenado de probetas.

Para determinar la resistencia a la compresión simple de la lechada diseñada se realizaron varias probetas, las cuales fueron posteriormente ensayadas en el laboratorio. Para la preparación de dichas probetas, se crearon 3 muestras individuales de lechada de cemento (A, B, y C). Cada una de estas muestras se empleó en la fabricación de tres probetas distintas, las cuales fueron sometidas a ensayos a los 7, 14 y 28 días respectivamente. De esta manera se pretende obtener resultados más representativos.

Figura 55. *Cuantificación del cemento.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 56. *Cuantificación del agua.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 57. *Cuantificación y mezcla del aditivo plastificante.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 58. *Elaboración de la lechada de cemento.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 59. *Llenado de los moldes con lechada de cemento.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 60. *Probetas desmoldadas.*



Nota: Elaboración propia.

3.2.3 Medición y rotura de probetas.

Previo la realización de los ensayos de compresión simple a las probetas, se realizó la medición y el pesaje de cada una de las muestras.

Figura 61. *Medición de las probetas.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 62. Pesaje de las probetas.



Nota: Elaboración propia.

Figura 63. Grupo de probetas, muestra A.



Nota: Elaboración propia.

Figura 64. Grupo de probetas, muestra B.



Nota: Elaboración propia.

Figura 65. Grupo de probetas, muestra C.



Nota: Elaboración propia.

Tabla 4. Pesaje y medición de las probetas de lechada de las muestras “A, B y C”, a los 7 días.

MUESTRAS DE LECHADA DE CEMENTO - 7 DIAS				
Muestra	Peso (Kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
A	0.228	4.7	10	17.35
B	0.222	4.6	10	16.62
C	0.234	4.6	10	16.62

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5. Pesaje y medición de las probetas de lechada de las muestras “A, B y C”, a los 14 días.

MUESTRAS DE LECHADA DE CEMENTO - 14 DIAS				
Muestra	Peso (Kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
A	0.235	4.7	10	17.35
B	0.227	4.7	10	17.35
C	0.238	4.6	10	16.62

Nota: Elaboración propia.

Tabla 6. Pesaje y medición de las probetas de lechada de las muestras “A, B y C”, a los 28 días.

MUESTRAS DE LECHADA DE CEMENTO - 28 DIAS				
Muestra	Peso (Kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
A	0.231	4.6	10	16.62
B	0.226	4.7	10	17.35
C	0.235	4.7	10	17.35

Nota: Elaboración propia.

Después de realizar las mediciones y pesajes de las probetas, se procedió a realizar el ensayo de resistencia a la compresión simple utilizando la máquina de prueba de fuerza compresiva, la cual forma parte del equipo del laboratorio CEINVES. Las especificaciones y características de este equipo se encuentran ilustradas en la Figura 66.

Figura 66. Características de la máquina de prueba de fuerza compresiva simple utilizada para los ensayos.



Nota: Elaboración propia.

Figura 67. Ajuste de la probeta en la máquina.



Nota: Elaboración propia.

Figura 68. Probeta antes y después del ensayo.



Nota: Elaboración propia.

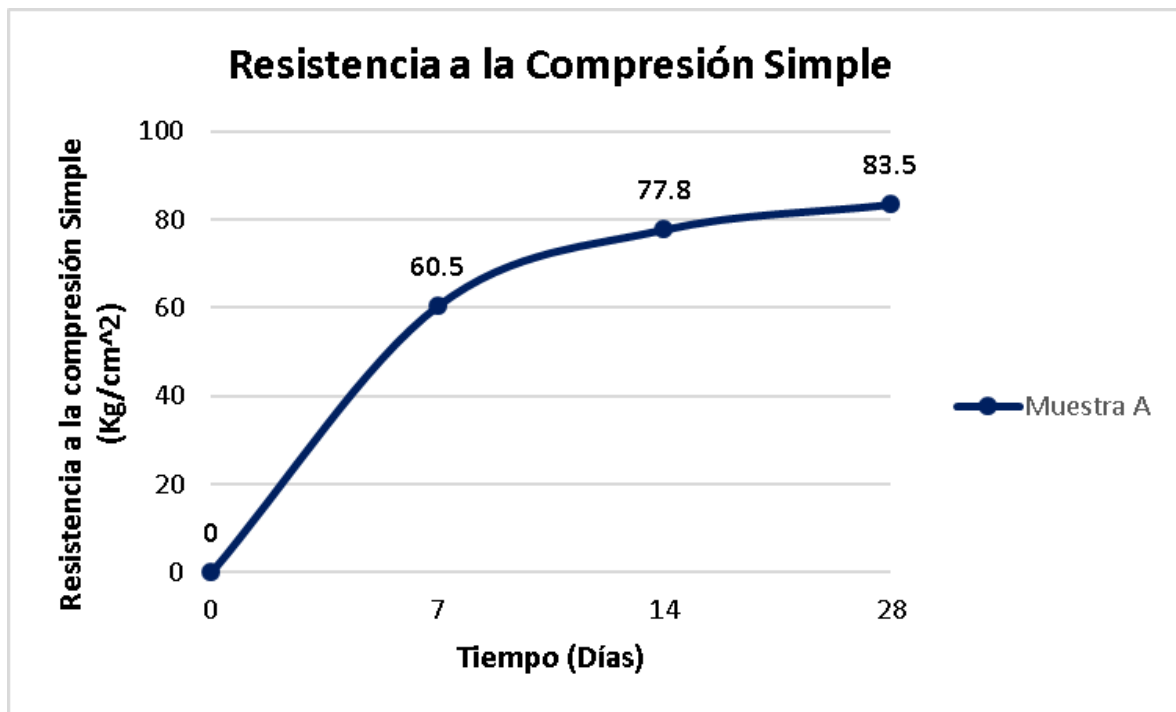
3.2.4 Resultados de los ensayos de laboratorio.

Tabla 7. Evolución de la resistencia a la compresión simple de las muestras de lechada de cemento (A, B y C).

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE			
Tiempo (Días)	Muestra A (Kg/cm ²)	Muestra B (Kg/cm ²)	Muestra C (Kg/cm ²)
0	0	0	0
7	60.5	57.8	54.8
14	77.8	72.3	69.9
28	83.5	78.2	75.4

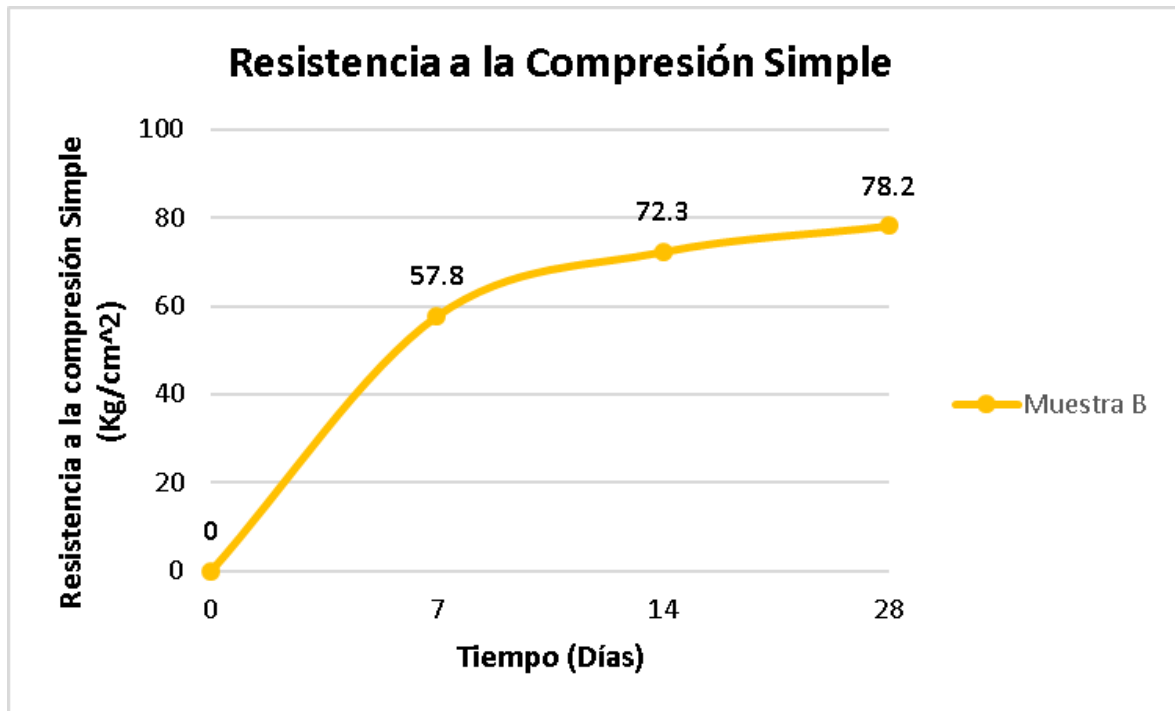
Nota: Elaboración propia.

Figura 69. Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra A.



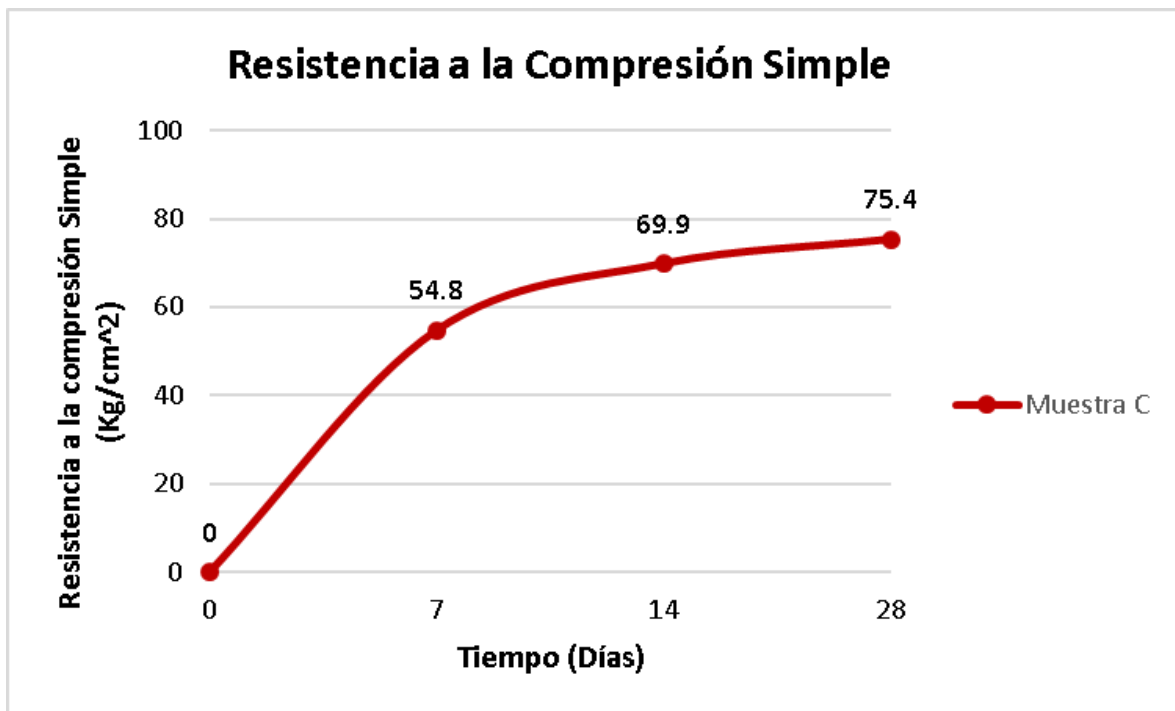
Nota: Elaboración propia.

Figura 70. Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra B.



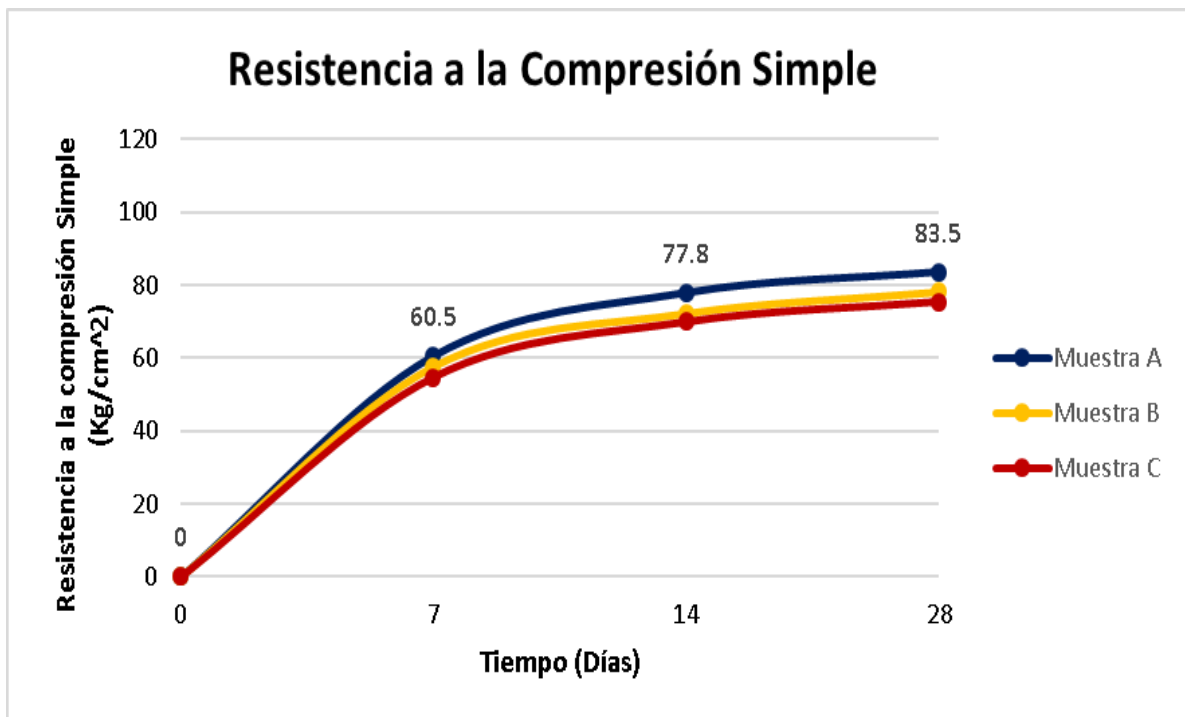
Nota: Elaboración propia.

Figura 71. Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestra C.



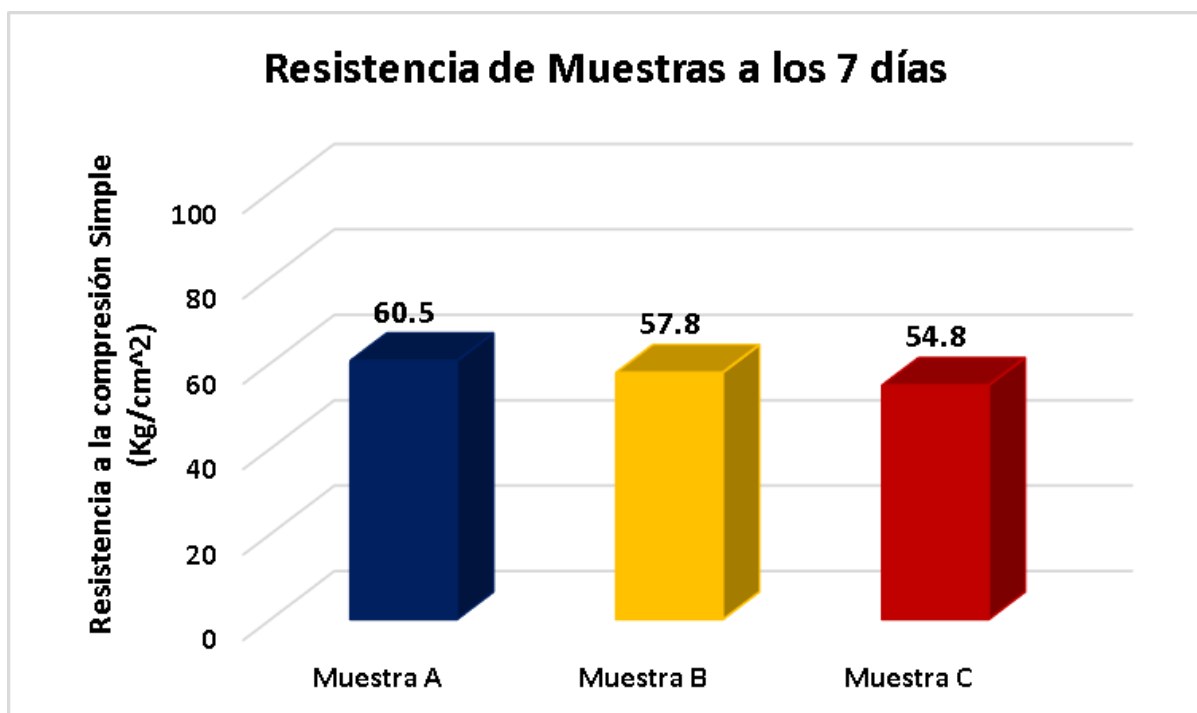
Nota: Elaboración propia.

Figura 72. Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple, muestras A, B y C.



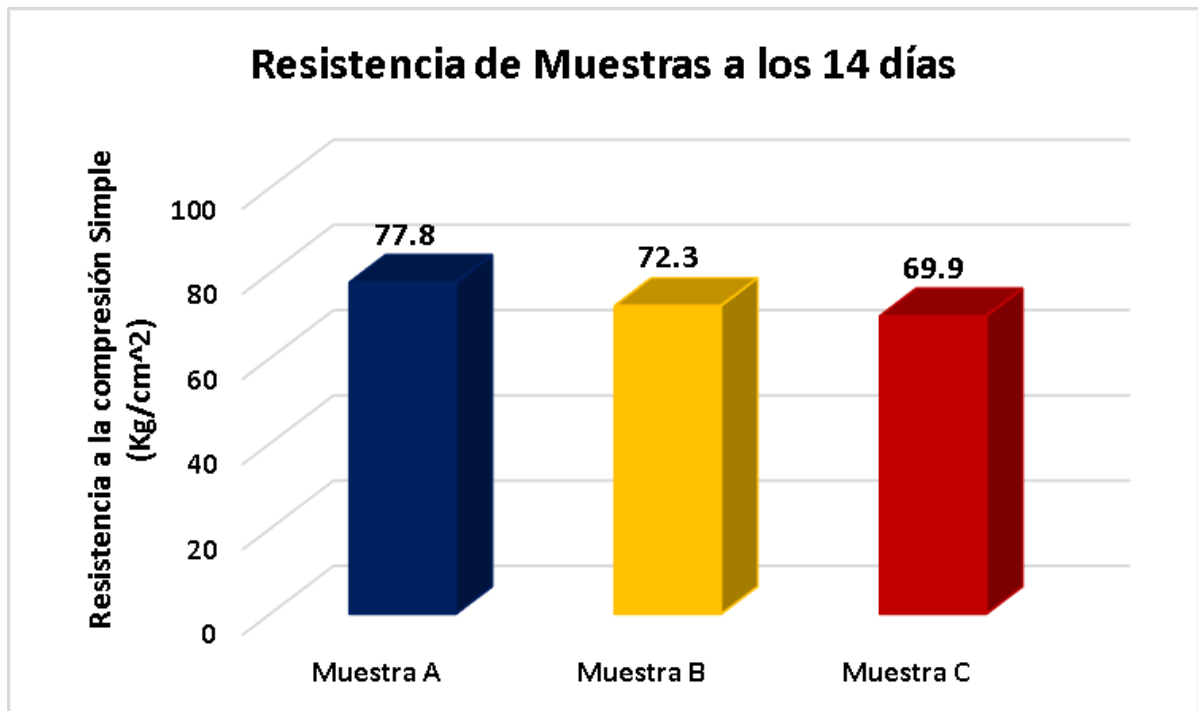
Nota: Elaboración propia.

Figura 73. Gráfico comparativo de la resistencia a compresión simple a los 7 días de las muestras de lechada de cemento A, B y C.



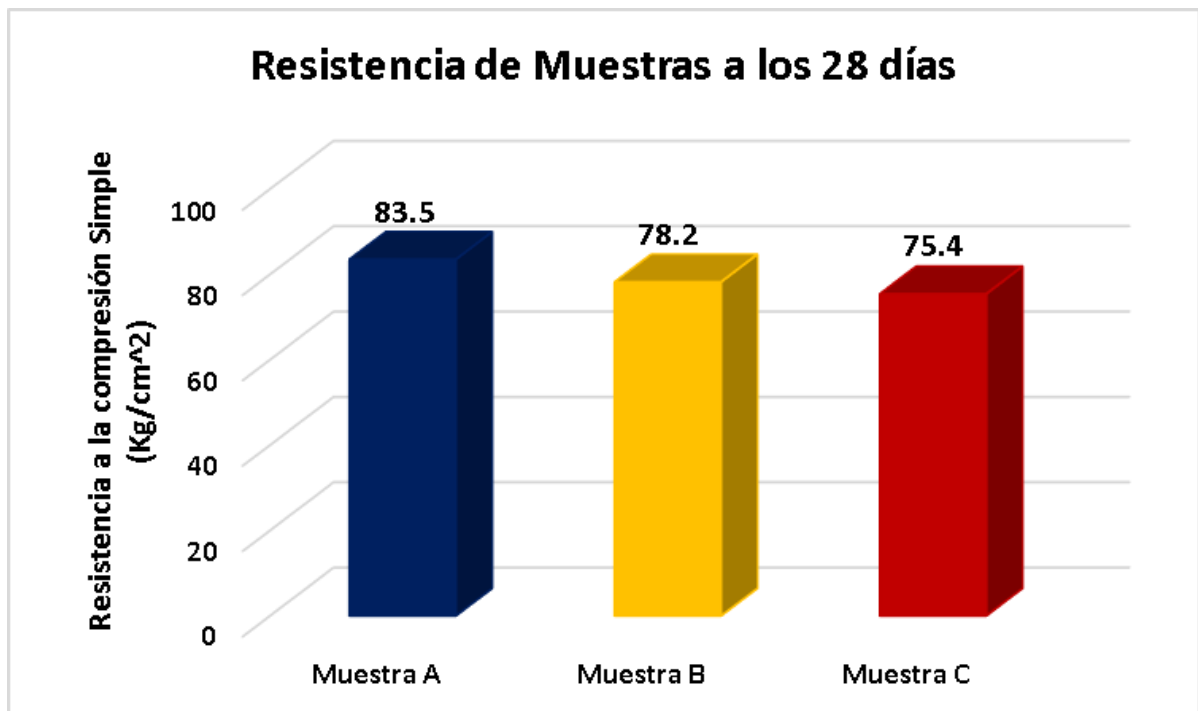
Nota: Elaboración propia.

Figura 74. Gráfico comparativo de la resistencia a compresión simple a los 14 días de las muestras de lechada de cemento A, B y C.



Nota: Elaboración propia.

Figura 75. Gráfico comparativo de la resistencia a compresión simple a los 28 días de las muestras de lechada de cemento A, B y C.



Nota: Elaboración propia.

3.3 Ensayos de laboratorio del material piedra – cemento.

En la preparación de las probetas para el material piedra-cemento, se utilizó la lechada diseñada, y al igual que para la lechada se realizaron pruebas para definir una granulometría de la piedra que permitiera la penetración de la lechada de manera satisfactoria. Se realizaron tres probetas de este material, las cuales fueron sometidas a pruebas de compresión simple a los 7, 14 y 28 días, respectivamente.

3.3.1 Granulometría de la piedra.

Para elegir una granulometría óptima de la piedra se buscó que la penetración de la lechada fuera satisfactoria. Para esto se debió escoger un tamaño de agregado grande que facilitara la penetración, pero considerando que a mayor tamaño de agregado se generan mayores espacios vacíos que la lechada deberá llenar, no sería conveniente usar un agregado muy grande. Por ende, se buscó un equilibrio al elegir un tamaño de agregado que satisficiera ambas condiciones.

Se pudo observar que los agregados con un tamaño alrededor de 3/4'' cumplían satisfactoriamente con la fácil penetración de la lechada, mientras que agregados significativamente menores a este valor presentaban cierto grado de resistencia a la penetración de la lechada. Es por esto que se optó por adquirir piedra 3/4'' y hacerle la respectiva granulometría. La granulometría de la piedra adquirida para las probetas se puede observar en la Tabla 8 y en la Figura 76.

En la tabla 9 se puede observar los coeficientes de curvatura y de uniformidad de la piedra que se utilizó en las probetas. La clasificación SUCS para este agregado es GP – Grava pobremente gradada.

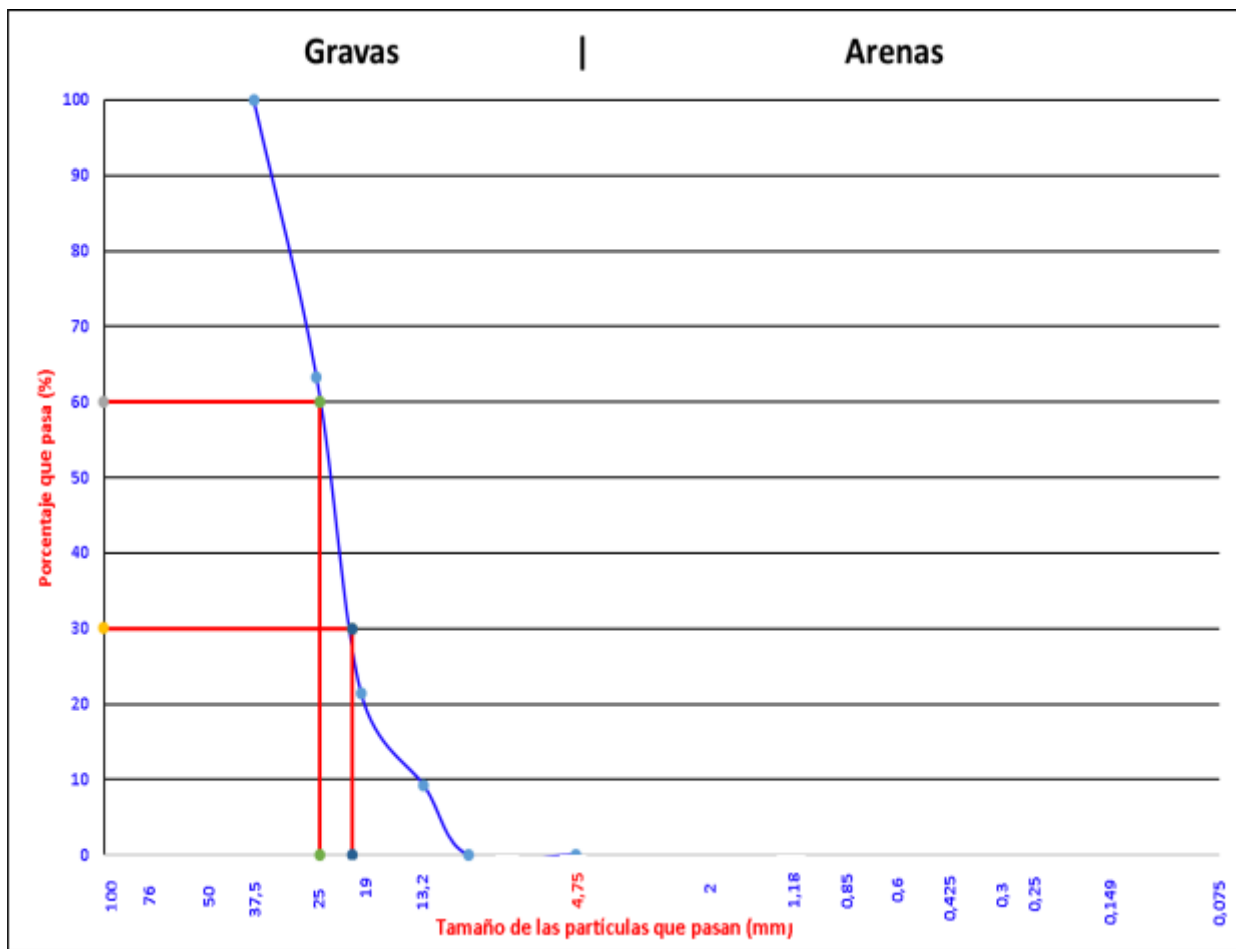
Tabla 8. *Granulometría de la piedra para las probetas.*

GRANULOMETRIA						
TAMICES ASTM		PESOS (gr.)		Porcentaje		% que pasa
Pulg.	mm	Parcial	Retenido acumulativo	Retenido	Retenido acumulativo	
1 1/2'	38.100	0.0	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	550.5	550.5	36.70	36.70	63.30

Pulg.	mm	Parcial	Retenido acumulativo	Retenido	Retenido acumulativo	% que pasa
3/4"	19.050	628.5	1179	41.90	78.60	21.40
1/2"	12.700	183.0	1362	12.20	90.80	9.20
3/8"	9.525	138.0	1500	9.20	100.00	0.00
N° 4	4.763	0.0	1500	0.00	100.00	0.00
Suma		1500.0				

Nota: Elaboración propia.

Figura 76. Curva granulométrica de la piedra para las probetas.



Nota: Elaboración propia.

Tabla 9. *Coeficientes de curvatura (Cc) y uniformidad (Cu) de la piedra para las probetas.*

Coeficiente de curvatura y uniformidad			
D60	24.831	Cc	1.26
D30	20.209	Cu	1.90
D10	13.042		

Nota: Elaboración propia.

3.3.2 Elaboración de las probetas.

Figura 77. *Llenado de los moldes con piedra.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 78. *Llenado de los moldes con lechada de cemento.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 79. *Finalización del llenado de los moldes.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 80. *Cilindro desmoldado.*



Nota: Elaboración propia.

3.3.3 Medición y rotura de las probetas.

Previo la realización de los ensayos de compresión simple a las probetas, se realizó la medición de cada una de las mismas. Los resultados de estas mediciones se pueden observar en la Tabla 9.

Figura 81. *Medición de las probetas.*



Nota: Elaboración propia.

Tabla 10. Dimensiones de las probetas del material piedra – cemento.

MUESTRAS MATERIAL PIEDRA - CEMENTO			
Tiempo	Altura	Diámetro	Área
(Días)	(cm)	(cm)	(cm²)
7	30	15.2	181.46
14	30	15.3	183.85
28	30	15.2	181.46

Nota: Elaboración propia.

Figura 82. Probeta antes y después del ensayo.



Nota: Elaboración propia.

Figura 83. *Pedazo de probeta de hormigón después de la rotura durante el ensayo de compresión simple.*



Nota: Elaboración propia.

Como se puede observar en a Figura 83, la lechada penetró de manera eficaz entre la piedra, llenando los espacios vacíos y proporcionando uniformidad a la probeta.

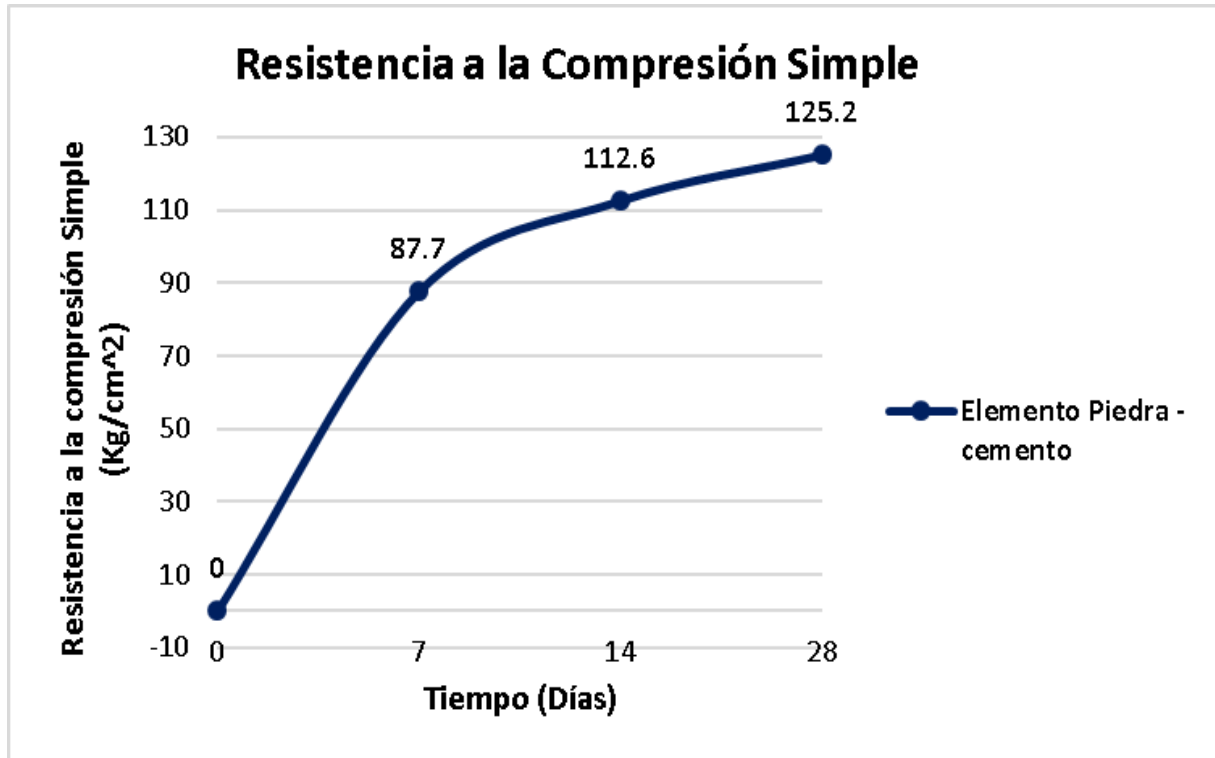
3.3.4 Resultados de los ensayos de laboratorio.

Tabla 11. *Evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra – cemento.*

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	
Tiempo (Días)	Resistencia (Kg/cm²)
7	87.7
14	112.6
28	125.2

Nota: Elaboración propia.

Figura 84. Curva de evolución de la resistencia a la compresión simple del material piedra – cemento.



Nota: Elaboración propia.

3.4 Tipo de geotextil.

El geotextil a utilizar será de tipo tejido, considerando las conclusiones de Murugesan y Rajagopal (2009), quienes indican que los geotextiles tejidos son más eficaces como revestimiento para las columnas de piedra. En especial para las columnas de piedra inyectadas y revestidas (CPIR) esto cobra más sentido, debido a que en este caso el geotextil debe resistir una presión lateral mayor en comparación con las columnas de grava revestidas (GEC) debido a la presión adicional que ejerce la lechada de cemento. En este sentido, los geotextiles tejidos suelen tener mayores resistencias a la tracción que los geotextiles no tejidos.

Además, el uso del geotextil en las CPIR no solo requiere resistir la presión lateral, sino también prevenir la fuga de la lechada de la columna. Los geotextiles tejidos son conocidos por cumplir mejor esta función en comparación con los no tejidos, ya que son menos permeables que los geotextiles no tejidos. Sin embargo, es crucial tener en cuenta la necesidad de retener la lechada, lo que implica la elección de un geotextil tejido con un tamaño de apertura de poro muy pequeño.

3.5 Fundición en laboratorio de un tramo de columna de piedra inyectada y revestida con geotextil.

Como parte de esta investigación, se llevó a cabo la fundición en laboratorio de un tramo de columna de piedra inyectada y revestida con geotextil. El proceso constructivo realizado en el laboratorio simula parcialmente la metodología propuesta en esta tesis, pero con ciertas diferencias debido a que se buscó que el elemento construido fuera visible por encima del suelo y además se realizó con métodos manuales y no con la maquinaria propuesta para esta metodología. A continuación, se detalla el proceso constructivo ejecutado:

1. Se introdujo la camisa de PVC en el suelo manualmente.

Figura 85. *Introducción de la camisa de PVC en el suelo.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 86. *Medición del volumen de la camisa de PVC.*



Nota: Elaboración propia.

2. Se colocó el geotextil tubular y el tubo de inyección dentro de la camisa de PVC.

Figura 87. *Colocación del geotextil tubular y el tubo de inyección dentro de la camisa de PVC.*



Nota: Elaboración propia.

3. Se introdujo la piedra dentro del geotextil.

Figura 88. Colocación de piedra dentro del geotextil.



Nota: Elaboración propia.

Figura 89. Columna de piedra antes de ser inyectada.



Nota: Elaboración propia.

4. Se realizó la inyección del elemento.

Figura 90. *Columna de piedra siendo inyectada.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 91. *Columna de piedra durante la inyección.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 92. *Columna de piedra después de la inyección.*



Nota: Elaboración propia.

Luego de 14 días desde la fundición de la columna de piedra inyectada y revestida con geotextil, se realizó el desmolde de la camisa de PVC y el retiro del geotextil para poder observar la formación de la columna de piedra inyectada.

Figura 93. *Retiro de la camisa de PVC.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 94. *Abultamiento de la columna debido a falla de la camisa de PVC.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 95. *Retiro del geotextil.*



Nota: Elaboración propia.

Figura 96. Columna de piedra inyectada y revestida con geotextil.



Nota: Elaboración propia.

A diferencia del método constructivo propuesto en esta tesis, en la construcción experimental en laboratorio de un tramo de columna de piedra inyectada y revestida con geotextil, se llevó a cabo la inyección de la lechada con la camisa aún colocada en el elemento. Esto se debió a la dificultad para realizar esta tarea con una camisa de PVC en lugar de una camisa metálica recuperable. Sin embargo, en la Figura 94 se observa que la camisa de PVC falló en un costado, lo que provocó un abultamiento en la columna. A pesar de ello, el geotextil cumplió su función y evitó el escape de la lechada, incluso cuando la camisa de PVC ya no estaba trabajando.

Otra diferencia notable en la construcción experimental del tramo de CPIR, en comparación con el método propuesto, es que el tubo de inyección permanece en la columna incluso después de completar el proceso de inyección. Esta decisión se tomó con el simple propósito de facilitar a los observadores la comprensión del proceso de inyección de la columna.

3.6 Análisis de precios unitarios del elemento propuesto.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Detalle: COLUMNA DE PIEDRA INYECTADA Y REVESTIDA CON GEOTEXTIL. D = 400 mm

Unidad: m

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
RETROEXCAVADORA 125 HP	1.00	56.00	56.00	0.3333	18.67
HERRAMIENTA MENOR (5% M.O.)					0.78
OTROS MENORES. (Equipo encam. llaves, acces. Etc.)	1.00	6.81	6.81	0.3333	2.27
CONCRETERA	1.00	4.38	4.38	0.3333	1.46
TUBERIA TREMIE	1.00	2.92	2.92	0.3333	0.97
SUBTOTAL M					24.15
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/hr	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
OP. RETROEXCAVADORA (E.O.C1)	1.00	4.55	4.55	0.3333	1.52
ENGRASADOR O ABASTECEDOR RESPONSABLE (E.O.D2)	1.00	4.19	4.19	0.3333	1.40
MAESTRO MAYOR EN EJECUCIÓN DE OBRAS CIVILES (E.O.C1)	1.00	4.65	4.65	0.3333	1.55
PEON/ AYUDANTE (albañil, carpintero, electricista, fierro, plomero) (E.O.E2)	8.00	4.14	33.12	0.3333	11.04
SUBTOTAL N					15.51
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	precio unitari	Costo	
		A	B	C=A*B	
MAT. TRITURADO 3/4" (19,0 mm)	m3	0.100	12.15	1.22	
CEMENTO	Kg	51.00	0.16	8.16	
AGUA	m3	0.03	1.24	0.04	
GEOTEXTIL	m2	1.26	1.66	2.09	
ADITIVO PLASTIFICANTE	Kg	0.800	2.44	1.95	
SUBTOTAL O				13.46	
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
		A	B	C=A*B	
TRANSPORTE DE MATERIALES	Glb	1.00	0.81	0.81	
SUBTOTAL P				0.81	
jun-23	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				53.93
	INDIRECTOS % 17.00%				9.17
	UTILIDAD %				0.00
	COSTO TOTAL DEL RUBRO				63.10
	VALOR OFERTADO				63.10

ESTE PRECIO NO INCLUYE IVA

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Detalle: PILOTE DE HORMIGON SIMPLE PREBARRENADO D = 400 mm f_c= 140 kg/cm²

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
GRUA DE ORUGAS (45 T)	1.00	95.00	95.00	0.3333	31.66
EQUIPO DE BARRENADO	1.00	45.00	45.00	0.3333	15.00
GRUA DE SERVICIO	1.00	65.00	65.00	0.3333	21.66
TUBERIA TREMIE	1.00	2.92	2.92	0.3333	0.97
OTROS MENORES. (Equipo encam. llaves, acces. Etc.)	1.00	6.81	6.81	0.3333	2.27
HERRAMIENTA MENOR (5% M.O.)					0.99
SUBTOTAL M					72.55
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/hr	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
OP. GRUA - TELESCOPICA (E.O.C1)	2.00	4.55	9.10	0.3333	3.03
ENGRASADOR O ABASTECEDOR RESPONSABLE (E.O.D2)	3.00	4.19	12.57	0.3333	4.19
MAESTRO MAYOR EN EJECUCIÓN DE OBRAS CIVILES (E.O.C1)	1.00	4.65	4.65	0.3333	1.55
PEON/ AYUDANTE (albañil, carpintero, electricista, fierro, plomero) (E.O.E2)	8.00	4.14	33.12	0.3333	11.04
SUBTOTAL N					19.81
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo	
		A	B	C=A*B	
HORMIGON f _c = 140 kg/cm ² BOMBEABLE	m ³	0.14	117.33	16.43	
BENTONITA	Kg	25.00	0.90	22.50	
VARIOS(AGUA, CAMISA METAL-BOCA, ETC.).	Glb	1.00	7.79	7.79	
SUBTOTAL O				46.72	
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
		A	B	C=A*B	
TRANSPORTE VARIOS	Glb	1.00	0.47	0.47	
SUBTOTAL P				0.47	
jun-23	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				139.55
	INDIRECTOS %				17.00%
	UTILIDAD %				0.00
	COSTO TOTAL DEL RUBRO				163.27
	VALOR OFERTADO				163.27

ESTE PRECIO NO INCLUYE IVA

3.7 Resultados y discusiones.

3.7.1 Método constructivo propuesto para las columnas de piedras inyectadas y revestidas (CPIR).

El método constructivo propuesto está diseñado para su implementación en suelos extremadamente blandos, caracterizados por una capacidad de soporte muy baja. Aprovechando la baja resistencia al corte que tienen estos suelos, se propone el uso de una retroexcavadora tanto para la hincada de la camisa metálica como para el llenado de la piedra en el geotextil. El uso de la retroexcavadora se justifica por su fácil acceso a estas áreas, y siendo esta la única maquinaria necesaria para la construcción de las CPIR, se convierte en un método económico y temporalmente viable.

Para aplicaciones en suelos con una resistencia al corte mayor a los suelos objetivos de esta propuesta, este método podría no ser viable debido a que la hincada de la camisa no podría llevarse a cabo de esta manera, además en estos suelos, otras alternativas de maquinaria podrían tener acceso más fácil y ser más adecuadas.

3.7.2 Resistencia del elemento obtenida.

En esta tesis se han limitado los ensayos a una sola combinación de lechada de cemento de baja resistencia y piedra con una granulometría óptima para trabajar conjuntamente, lo cual facilitó la realización de los ensayos en el laboratorio. Sin embargo, dada la diversidad de proyectos y las necesidades variables de resistencia en la construcción de columnas de piedra inyectada y revestida (CPIR), resulta necesario desarrollar combinaciones de lechada y piedra adaptadas a requerimientos específicos de resistencia.

También es importante resaltar que, como se ha podido observar, la resistencia a la compresión simple del material compuesto por piedra y cemento es aproximadamente un 50% mayor que la resistencia de la lechada diseñada. Sin embargo, es importante destacar que este aumento es específico para esta combinación particular de piedra y lechada, y no debe considerarse como una referencia para determinar el incremento de resistencia en otros diseños de piedra y lechada. Ya que este aumento específico en la resistencia puede deberse a una serie de características del diseño, como la granulometría de la piedra, la calidad de la filtración de la lechada en el elemento, la resistencia de la lechada, entre otros factores. Es importante reconocer que estos elementos pueden variar significativamente entre diferentes diseños, lo que podría alterar la relación entre la resistencia de la piedra-cemento y la lechada.

3.7.3 Tipo de geotextil.

El geotextil elegido para la formación de las CPIR en esta investigación fue el geotextil tejido, esto debido a sus propiedades como la alta resistencia a la tracción y su baja permeabilidad. No obstante, las geomembranas podrían ser una alternativa eficaz en situaciones específicas. Esto se debe a que la geomembrana se distingue por su impermeabilidad, ofreciendo un rendimiento superior en comparación con el geotextil tejido en términos de contención. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el costo de la geomembrana tiende a ser más elevado y su resistencia suele ser más baja que la del geotextil tejido.

3.7.4 CPIR como método de mejoramiento de suelos blandos.

La revisión bibliográfica de esta tesis ha demostrado que las columnas de piedra inyectadas son comúnmente utilizadas como elementos tipo pilotes dentro del sistema de "terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos (GPE)". El cálculo de la capacidad de carga de estas columnas se basa en los mismos principios empleados en el cálculo de pilotes convencionales por punta. Este sistema puede ser utilizado tanto para la construcción de infraestructura vial como para la construcción de edificaciones.

En proyectos de infraestructura vial, el sistema de pilotes y geosintético mejora significativamente la estabilidad y la capacidad de carga de la subrasante sobre la cual se construye el terraplén para la estructura vial.

Por otro lado, en el ámbito de la construcción de edificaciones, el sistema GPE funciona como un mejoramiento de suelos, proporcionando una base sólida y estable sobre la cual se puede construir la edificación. En este caso, al igual que en el anterior, los pilotes y el geosintético mejoran la estabilidad y la capacidad de carga del suelo, proporcionando una plataforma confiable para la construcción. A su vez, el terraplén desempeña múltiples funciones esenciales dentro del sistema. No solo facilita la distribución uniforme de las cargas en el sistema, sino que también protege el geosintético de daños y proporciona una superficie nivelada, estable y compactada sobre la cual edificar.

Cabe recalcar que este enfoque recomendado en esta tesis es solo un ejemplo de los posibles usos que puedan tener las columnas de piedra inyectadas como elementos tipo pilotes, futuras investigaciones podrían ampliar el uso de estos elementos en otros tipos de sistemas constructivos.

CONCLUSIONES

- El método de las columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil (CPIR) se fundamenta técnicamente como una alternativa constructiva en suelos muy blandos al ser una extensión de las columnas inyectadas con lechada de cemento (GSC, grouted stone columns) utilizadas actualmente en diferentes países alrededor del mundo y de las cuales se realizó una investigación bibliográfica en esta tesis. Este método propuesto a su vez se considera económicamente viable, apoyándose en el análisis de precios realizado en el presente trabajo de investigación el cual fue derivado de los ensayos de laboratorio llevados a cabo como parte fundamental de esta tesis.
- El presente trabajo de investigación contempla el diseño de una combinación de lechada de cemento y piedra con una granulometría óptima para lograr la adecuada formación de las CPIR. Sin embargo, en situaciones que requieran una resistencia distinta a la propuesta, se hace necesario explorar otras combinaciones de lechada y piedra. Estas nuevas formulaciones deben ser evaluadas para asegurar tanto la resistencia deseada como la adecuada penetración de la lechada en la piedra, considerando la granulometría seleccionada.
- Este método constructivo ofrece una alternativa viable tanto para proyectos viales como para edificaciones en suelos sumamente blandos, como los suelos en zona de interfaz del complejo deltaico estuarino en la ciudad de Guayaquil, en donde el uso de maquinaria convencional se ve limitado debido a la baja resistencia de estos terrenos.

RECOMENDACIONES

- Para el empleo de las columnas de piedra inyectadas y revestidas, se sugiere elaborar un diseño específico de piedra-lechada adaptado a las necesidades de resistencia de cada proyecto en particular.
- Así mismo, para la implementación de las CPIR como parte del sistema de "terraplén soportado por pilotes y reforzado con geosintéticos", se hace necesario realizar los cálculos pertinentes para determinar la resistencia requerida de la geomalla de refuerzo.
- Se recomienda para futuras investigaciones examinar la viabilidad de incorporar elementos de acero en las CPIR, así como llevar a cabo pruebas de carga con el propósito de evaluar su capacidad para integrarse como elementos estructurales dentro de la obra.
- Se sugiere también para futuras investigaciones explorar la posible aplicación de las CPIR en otros sistemas constructivos, ampliando así el campo de aplicación de esta tecnología.
- Por último, se propone para futuras investigaciones investigar el potencial uso de las CPIR como elementos tipo pilotes de fuste, lo que podría permitir evitar la necesidad de alcanzar estratos resistentes en proyectos de cimentación.

Referencias.

- Acosta, A., Guerrero, D., León, R., Oña, P., Cruz, M., & Toulkeridis, T. (2016). Cualificación y cuantificación de fallas geológicas en el Distrito Metropolitano de Quito. *Revista De Ciencias De Seguridad Y Defensa*, 1(3), 8-25.
- Alexview, D., Brokemper, D., & Lothspeich, S. (2012). Geotextile Encased Columns (GEC): Load Capacity, Geotextile Selection and Pre-Design Graphs. *Contemporary Issues in Foundation Engineering*. [https://doi.org/10.1061/40777\(156\)12](https://doi.org/10.1061/40777(156)12)
- Alexview, D., & Thomson, G. (2014). *Geotextile Encased Columns (GEC): Why, where, when, what, how?* Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment., Brisbane, Australia.
- Almeida, M., Riccio, M., Hosseinpour, I., & Alexview, D. (2018). *Geosynthetic Encased Columns for Soft Soil Improvement (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315177144>
- Barksdale, R., & Bachus, R. (1983). *Design and construction of stone columns, vol. I*. United States. Federal Highway Administration. Office of Engineering & Highway Operations Research and Development. <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/25319>
- 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 de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5372>
- Castro, J. (2008). *Análisis teórico de la consolidación y deformación alrededor de columnas de grava*. [Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/1203>
- Castro, J. (2017). Modeling stone columns. *Materials*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/ma10070782>
- Cimentada, A. (2009). *Análisis experimental en modelo reducido de la consolidación radial y deformación de un suelo blando mejorado con columnas de grava*. [Universidad de Cantabria]. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/1199>
- Clausen, B. (2016). *La geología de las Islas Galápagos*. <https://www.grisda.org/espanol/articulos>

- Cobos, L., & Montenegro, G. (2010). *Estudio integrado del golfo de Guayaquil del mioceno al reciente*. https://www.researchgate.net/publication/41584113_Estudio_integrado_del_golfo_de_Guayaquil_del_mioceno_al_reciente
- Collot, J.-Y., Sallares, V., & Pazmiño, N. (2009). *Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador*. Comisión Nacional del Derecho del Mar (CNDM). https://www.academia.edu/35665522/Geologia_y_Geofisica_Marina_y_Terrestre_del_Ecuador
- Folguera, A., & Spagnuolo, M. (2010). *De la Tierra y los planetas rocosos. Una introducción a la tectónica*. Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/104861>
- Gallardo, G., & Toulkeridis, T. (2008). *Cuevas volcánicas y otras atracciones espeleológicas*. Centro de geología, volcanología y geodinámica (CGVG). https://www.researchgate.net/publication/280331411_Cuevas_volcanicas_y_otras_atracciones_espeleologicas_volcanic_caves_and_other_speleological_attractions_Santa_Cruz_-_Galapagos
- Gniel, J., & Bouazza, A. (2010). Construction of geogrid encased stone columns: A new proposal based on laboratory testing. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.12.012>
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., & Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 3(9), 802-806. <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>
- Heitz, C., Kempfert, H.-G., & Alexview, D. (2006). *Embankment project on soft subsoil with grouted stone columns and geogrids*. 1359-1362. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-656-9-1359>
- Holguin, J. (2022). Varias zonas de Guayaquil quedaron anegadas por fuerte lluvia. *El Comercio*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/seguridad/zonas-guayaquil-lluvias-inundaciones-traffic.html>
- Hughes, J., & Withers, N. (1974). *Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns*. <https://www.geplus.co.uk/technical-paper/technical-paper-reinforcing-of-soft-cohesive-soils-with-stone-columns-01-05-1974/>

- Kempfert, H.-G. (2003). *Ground improvement methods with special emphasis on column-type techniques*. Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice. <https://www.semanticscholar.org/paper/Ground-improvement-methods-with-special-emphasis-on-Kempfert/c2f963587b191219e495bec552be521f622469cb>
- Kempfert, H.-G., Göbel, C., Alexview, D., & Heitz, C. (2004). German Recommendations for Reinforced Embankments on Pile-similar Elements. *Proceedings of the 3rd European Geosynthetics Conference*, 279-284.
- Liu, H., Kong, G., Chu, J., & Ding, X. (2015). Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11), 1725-1733. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0284>
- Magnan, J. P., Droniuc, N., Canepa, Y., & Dhouib, A. (2005). *Réflexions sur la conception des colonnes ballastées*. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Osaka). <https://www.issmge.org/publications/publication/reacute-flexions-sur-la-conception-des-colonnes-ballasteacutees>
- Michaud, F., Witt, C., Bustillos, J., & Peñafiel, L. (2006). *Influencia de la subducción de la cordillera de Carnegie sobre la geología del Ecuador: Realidad y ficción*. Memorias: sextas jornadas en ciencias de la tierra.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). (2015). *NEC-SE-DS. Norma Ecuatoriana de la Construcción—Peligro Sísmico (Diseño Sismo Resistente)*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- Murugesan, S., & Rajagopal, K. (2009). Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 129-139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000187](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000187)
- Oteo, C. (2011). *Filosofía del diseño y ejecución de terraplenes y su patología (II)*. 10-22.
- Pazmiño, N., & Michaud, F. (2009). *Descripción de los Sedimentos Marinos en la Cordillera Submarina de Carnegie*. 240-245.
- Raithel, M., Kempfert, H.-G., & Kirchner, A. (2002). *Geotextile-Encased Columns (GEC) for Foundation of a Dike on Very Soft Soils*. 3. <https://library.geosyntheticssociety.org/proceedings/geotextile-encased-columns-gec-for-foundation-of-a-dike-on-very-soft-soils-pdf/>

- Raju, V., Krishna, R., & Wegner, R. (2004). *Ground Improvement using Vibro Replacement in ASIA 1994 to 2004*. 1-20. <https://docplayer.net/35122545-Ground-improvement-using-vibro-replacement-in-asia-1994-to-2004.html>
- Sánchez, N. (2013). *Licuefacción de suelos*. <https://es.slideshare.net/nestorluissanchez/licuefaccin-desuelos21>
- Ünver, M., & Ünver, İ. (2021, noviembre 29). *A preliminary design of ground improvement by grouted stone columns for a shopping centre*. 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site. https://www.researchgate.net/publication/356616645_A_preliminary_design_of_ground_improvement_by_grouted_stone_columns_for_a_shopping_centre
- Yangari, D. (2019). *Falla Dolores Guayaquil*. <https://es.scribd.com/document/417615663/falla-dolores-guayaquil>
- Yepes, V. (2015). Pilotes perforados de camisa recuperable: Pilote CPI-4. *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/01/30/pilotes-cpi-4/>
- Yepes, V. (2019). Columnas de gravas. *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/06/18/columnas-de-gravas/>
- Yepes, V. (2021). Columna de grava inyectada. *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/02/24/columna-de-grava-inyectada/>
- Zhou, C., Yin, J.-H., & Ming, J.-P. (2002). Bearing capacity and settlement of weak fly ash ground improved using lime – fly ash or stone columns. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 585-596.



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Espinel Acosta, Alan Fernando**, con C.C: # 1313382200 autor del trabajo de titulación: **Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil para mejoramiento de suelos blandos de Guayaquil**, 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, **09 de febrero del 2024**

f. 

Nombre: **Espinel Acosta, Alan Fernando**

C.C: **1313382200**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Columnas de piedra inyectadas y revestidas con geotextil para mejoramiento de suelos blandos de Guayaquil.		
AUTOR(ES)	Espinel Acosta, Alan Fernando		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Martínez Rehpani, Colón Gilberto M.Sc.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	09 de febrero del 2024	No. DE PÁGINAS:	105
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ingeniería, Geotecnia, Construcción.		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Columnas de Piedra, Inyecciones de Lechada de Cemento, Geotextil, Mejoramiento de Suelos, Columnas de Piedra Inyectadas, Columnas de Piedra Revestidas con Geosintéticos, Suelos Blandos.		
RESUMEN:	<p>En el presente Trabajo de Titulación se realiza una investigación bibliográfica exhaustiva sobre el uso, aplicación, principios teóricos y enfoque metodológicos de las columnas de piedra revestidas con geotextil y las columnas de piedra inyectadas con lechada de cemento. Se analizan casos de estudio sobre construcciones que emplean estos sistemas y se evalúa el desempeño que presentan los mismos.</p> <p>Posteriormente, se propone la implementación de un nuevo elemento constructivo basado en estos enfoques para el mejoramiento de suelos blandos en la ciudad de Guayaquil, así como una metodología constructiva económicamente viable para este elemento. La metodología propuesta está diseñada para su aplicación en suelos sumamente blandos donde la maquinaria de construcción común enfrenta limitaciones de acceso.</p> <p>El elemento constructivo propuesto es la columna de piedra inyectada y revestida con geotextil, el cual combina ambos enfoques antes mencionados y aprovecha los materiales de manera que la construcción del elemento resulte rápida y económica. Se llevan a cabo ensayos para obtener una lechada de cemento y una granulometría de la piedra que posibiliten la incorporación óptima de ambos materiales en el elemento, asegurando condiciones adecuadas.</p> <p>En este diseño, el geotextil funciona como una barrera que impide la fuga de la lechada de cemento fuera del elemento hacia el suelo circundante, y a su vez, evita que el agua del nivel freático se mezcle con la lechada dentro del elemento.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-99 169 0125	E-mail: alanespinel@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN(COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Glas Cevallos, Clara Catalina		
	Teléfono: +593-4-2206956		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			